

# Влияние защитного экрана на светораспределение светильника

При разработке светодиодного светильника важно учитывать множество параметров — светотехнических, электрических и эксплуатационных. Но основным назначением светового прибора (СП) является перераспределение света в пространстве в соответствии с требованиями к осветительным установкам. Поэтому при разработке важно проводить оценку влияния элементов конструкции на кривую силы света (КСС) светильника с целью получения эффективного и экономичного прибора. Цель данной статьи — рассмотреть и определить степень влияния защитного экрана на светораспределение СП в зависимости от его формы и используемого материала, а также оценить световые потери, вносимые этим конструктивным элементом.

## Физика света

Главным аргументом в пользу учета влияния защитного экрана на распределение силы света в пространстве является простое физическое явление — отражение света от поверхности стекла. Этот процесс описывается законом Снеллиуса [1] (рис. 1):

$$n_1 \sin \Theta_i = n_2 \sin \Theta_r \quad (1)$$

где  $n_1, n_2$  — показатели преломления первой и второй среды соответственно. Обычно первой средой является воздух, и  $n_1 = 1$ .

Интенсивность отраженной и преломленной волны определяется формулами Френеля [2] для коэффициентов отражения (2, 3) и пропускания (4, 5). Пренебрежем эффектом

светопоглощения в материале как незначительным по сравнению с отражением. Формулы Френеля приводятся для двух типов линейной поляризации. Поляризация — свойство электромагнитных волн, характеризующее направление изменения электрического поля. В случае  $p$ -поляризованного света колебания возмущения происходят в плоскости падающего и отраженного луча, в случае  $s$ -поляризованного света — в плоскости, перпендикулярной плоскости падающего и отраженного луча. Помимо линейной поляризации различают круговую и эллиптическую. Но для большинства случаев достаточно просто знать, поляризован свет или нет (неполяризованный свет называют естественным). Явление поляризации света

можно наблюдать, надев очки с соответствующим покрытием. Если при смене обычных солнцезащитных очков на «полароиды» изменилась яркость некоторых предметов, значит, эти предметы являются источниками поляризованного света.

Зависимости коэффициентов отражения от угла падения сильно отличаются (рис. 2), и для точных расчетов необходимо располагать информацией о степени поляризации выбранного источника света.

Коэффициенты отражения:

$$R_p = \frac{tg^2(\Theta_i - \Theta_t)}{tg^2(\Theta_i + \Theta_t)} \quad (2)$$

$$R_s = \frac{\sin^2(\Theta_i - \Theta_t)}{\sin^2(\Theta_i + \Theta_t)} \quad (3)$$

Коэффициенты пропускания:

$$T_p = 1 - R_p \quad (4)$$

$$T_s = 1 - R_s \quad (5)$$

где  $R_p$  — коэффициент отражения для  $p$ -поляризованного света;  $R_s$  — коэффици-

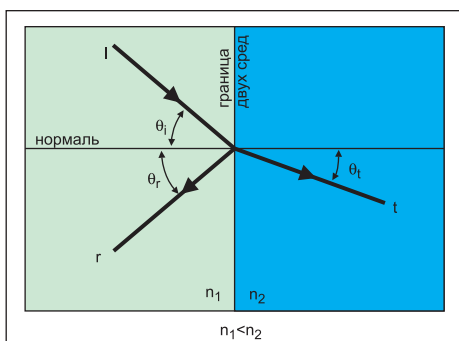


Рис. 1. Отражение и преломление светового луча на границе раздела двух сред ( $i$  — падающая волна,  $r$  — отраженная,  $t$  — преломленная,  $\Theta_i$  — угол падения,  $\Theta_r$  — угол отражения,  $\Theta_t$  — угол преломления)

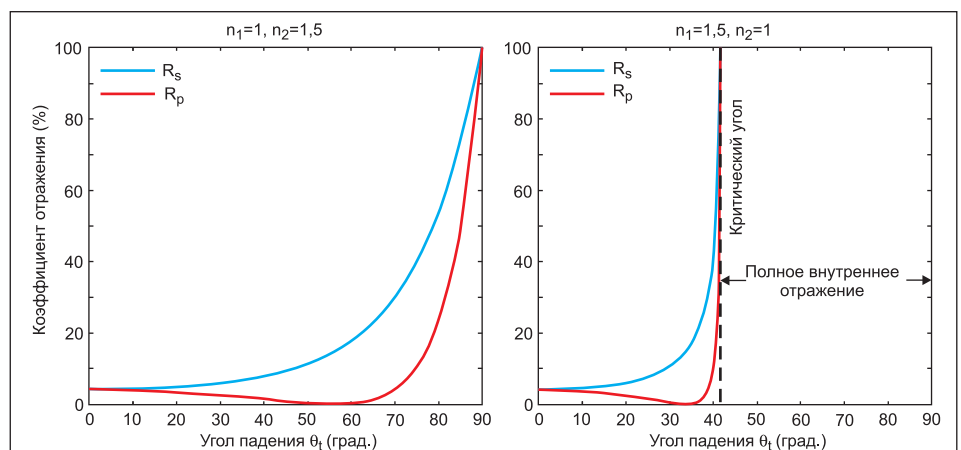


Рис. 2. Зависимость коэффициента отражения от угла падения ( $S$  — плоскость поляризации перпендикулярна плоскости падающего и отраженного луча;  $P$  — плоскость поляризации волн лежит в плоскости падающего и отраженного луча)

ент отражения для s-поляризованного света;  $T_p$  и  $T_s$  — коэффициенты пропускания для p- и s-поляризованного света соответственно;  $\Theta_i$  — угол падения;  $\Theta_t$  — угол преломления.

Для неполяризованного (естественного) света используется среднее между  $R_p$  и  $R_s$  значение коэффициента отражения, то есть:

$$R = (R_p + R_s) / 2. \quad (6)$$

Кристалл светодиода, как и люминофор, является источником неполяризованного света, поэтому в большинстве случаев при расчете светодиодных осветительных приборов поляризация не учитывается.

Для решения практических задач сухая теория не представляет интереса. Рассмотрим приложение данной теории применительно к некоторым типовым случаям.

### Светильник с плоским защитным экраном

Как уже было упомянуто ранее, на форму КСС светодиодного светильника оказывает влияние множество факторов: начиная от типа и расположения светодиодов и заканчивая формой и материалами, из которых выполняются конструктивные элементы. С целью упрощения задачи оценим влияние плоского защитного экрана (плоскопараллельной пластинки) на светораспределение источника света (ИС) без учета влияния корпуса светильника.

В настоящее время в светильниках используется большое разнообразие материалов для экранов (силикатные стекла, стекла типа М1–М7, поликарбонаты, полиметилметакрилаты (ПММА), различные закаленные стекла и т. д.). Но диапазон изменения их показателя преломления довольно узок — 1,46–1,58. При среднем значении показателя преломления  $n = 1,5$  доля отраженного от защитного экрана света (т. е. потерянного) составляет 4–15% и зависит от угла падения (рис. 1). При малых значениях углов падения потери минимальны (4%) и возрастают при увеличении угла. При угле падения  $60^\circ$  потери на отражение составляют 15%.

В светодиодных светильниках в качестве оптической части, с помощью которой происходит формирование угла излучения (широкого, узкого или среднего), используются светодиоды

как с различной оптикой (рефлекторами), так и без.

Оценим влияние защитного стекла на светораспределение ИС для двух условно крайних случаев: узкие  $\alpha_{yz} = 0-20^\circ$  и широкие  $\alpha_{ш} = 60-70^\circ$ . Согласно графикам на рис. 2, величина отражения  $R(\alpha_{yz}) = 4-6\%$ ,  $R(\alpha_{ш}) = 11-15\%$ , с учетом формулы (6) для неполяризованного света. Для удобства сравнения возьмем источник с постоянной КСС во всем диапазоне выбранных углов излучения, т. е. относительные значения силы света по всем углам равны 1 и не зависят от  $\alpha$ .

На рис. 3 представлена упрощенная оптическая схема такого светильника. Толщина пластинки составляет 2 мм. При узких углах излучения величина ожидаемых потерь на отражение, как уже отмечалось, составляет:  $R(\alpha_{yz}) = 2 \times (4-6)\%$ ; для широких —  $R(\alpha_{ш}) = 2 \times (11-15)\%$ . Удвоение соответствует отражению от первой и второй поверхностей защитного стекла. Оценим распределение силы света от него и сравним с полученными значениями в случае того же светильника, но без защитного стекла.

На рис. 3 показан ход лучей, излученных источником света, отраженных и преломленных как на границе, так и в толще стекла. На рис. 4, 5 показано, как влияет плоское стекло на кривые силы света для ИС с  $\alpha_{yz}$  и  $\alpha_{ш}$ . По рис. 4 видно, что при использовании оптической части с узким углом излучения защитный экран не влияет на форму КСС. В данном случае потери на отражение от границ раздела «воздух–стекло» и «стекло–воздух» составляют 9% вне зависимости от  $\alpha$  (таблица 1).

По рис. 5 видно, что экран существенно влияет на форму КСС при  $\alpha > 60^\circ$ . Отметим, что при  $\alpha = 70^\circ$  величина потерь вследствие отражения на двух границах раздела сред составляет 26%. При этом общие потери светового потока, т. е. суммарная доля отраженного света по всем углам в диапазоне  $\alpha_{ш}$ , составляют около 15% (таблица).

Величина угла, начиная с которого существенно увеличиваются потери на отражение, различна для разных материалов и зависит от коэффициента преломления. Этот угол связывают с углом полного внутреннего отражения (ПВО). Угол  $\alpha_{пво}$  рассчитывается по формуле:

$$\alpha_{пво} = \arcsin(1/n), \quad (7)$$

где  $n$  — показатель преломления материала, из которого выполнен защитный экран.

Таким образом, форма КСС светильника с плоским защитным экраном зависит от угла падения света от источника: при  $\alpha \leq \alpha_{пво}$  (рис. 4) коэффициент отражения практически не меняется, и силы света в данном диапазоне углов постоянны, поэтому форма КСС сохраняется. При  $\alpha > \alpha_{пво}$  (рис. 5) потери на отражение возрастают нелинейно, поэтому силы света меняются также нелинейно, что приводит

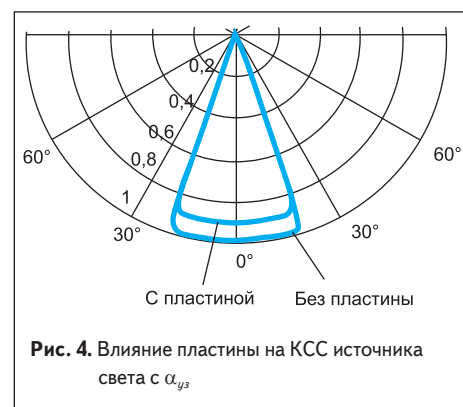


Рис. 4. Влияние пластины на КСС источника света с  $\alpha_{yz}$

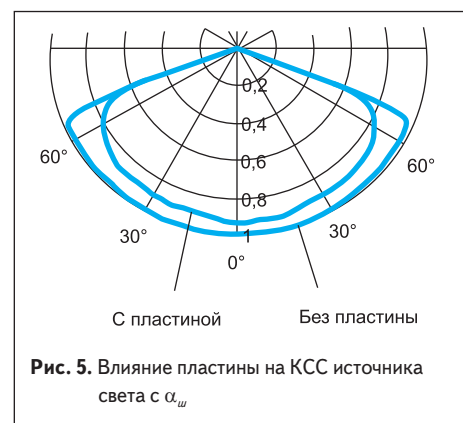


Рис. 5. Влияние пластины на КСС источника света с  $\alpha_{ш}$

к существенному изменению формы КСС светильника.

### Оценка влияния стекла на форму КСС с учетом степени поляризации света

Как уже отмечалось, светодиоды являются источниками неполяризованного света, но свет может приобрести некоторую поляризацию в результате взаимодействия с материалами светильника, а именно при отражении от элементов конструкции или в результате светорассеяния. При отражении от любой поверхности свет приобретает частичную поляризацию. В отраженном свете преобладают колебания, перпендикулярные к плоскости падающего и отраженного луча [3]. Кстати, этот эффект можно наблюдать, взглянув, например, на поверхность воды в солнечный день через поляризационные очки. Через очки отраженный свет (в виде бликов) будет казаться менее ярким, чем при использовании обычных солнцезащитных очков (без поляризационного покрытия). Также свет может приобрести некоторую поляризацию и в результате рассеяния в оптических элементах (в линзах), но в меньшей степени, чем при отражении. Эффект поляризации при рассеянии заметен при наблюдении ясного неба в солнечный день через поляризационные очки (свет поляризуется при рассеянии в атмосфере). Через очки

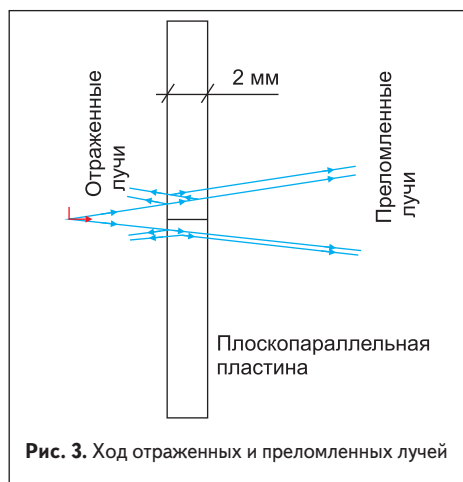


Рис. 3. Ход отраженных и преломленных лучей

Т а б л и ц а . Общие потери светового потока при различных значениях угла излучения

Угол или диапазон углов, град.	$\alpha_{yz} = 20$	$\alpha_{yz} = 0-20$	$\alpha_{ш} = 70$	$\alpha_{ш} = 0-70$
Потери на отражение R, %	9	9	26	15

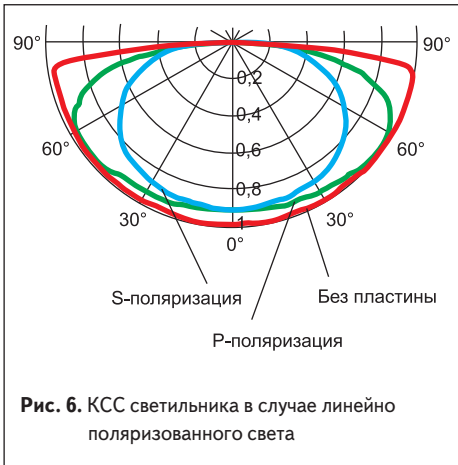


Рис. 6. КСС светильника в случае линейно поляризованного света

яркость неба будет меняться при их вращении, т. е. при изменении угла между плоскостью поляризации и осью поляризатора в очках. Поэтому рассмотрим зависимости потерь при отражении от стекла от состояния поляризации света. На рис. 6 представлены КСС светильника для трех случаев:

- светильник без стекла;
- светильник с защитным стеклом, свет имеет s-поляризацию;
- светильник с защитным стеклом, свет имеет р-поляризацию.

В случае р-поляризованного света (кривая  $R_p$  на рис. 2) отражение оказывает влияние при углах выше 70°; более того, видно, что при углах  $\approx 57^\circ$  отражение стремится к нулю.

В случае s-поляризации (кривая  $R_s$  на рис. 2) все значительно хуже: отражение значительно уже при углах выше 40°.

Но эти зависимости приведены для 100% поляризованного света, к тому же использовалась модель ИС с равномерным светораспределением.

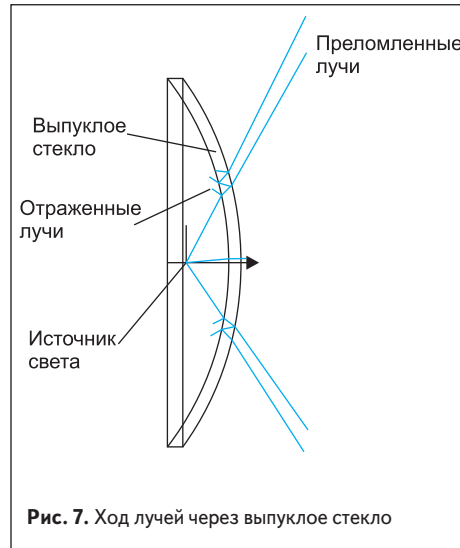


Рис. 7. Ход лучей через выпуклое стекло

На практике же все ИС (светодиоды) имеют косинусное светораспределение и, как правило, сила света в направлении угла 60° вдвое меньше осевой силы света. Кроме того, при однократном отражении (преломлении) степень поляризации не превышает 15%. Из этого следует вывод, что поляризация на конечный результат оказывает незначительное влияние.

### Оценка влияния экрана выпуклой формы

Как было рассмотрено выше, в случае ИС с  $\alpha_{\text{ис}}$  влияние плоского экрана на форму КСС велико. Можно ли существенно улучшить ситуацию? На первый взгляд решение очевидно — использовать защитный экран выпуклой формы, тем самым снижая угол падения (рис. 1). Это решение не может быть универсальным. Наличие

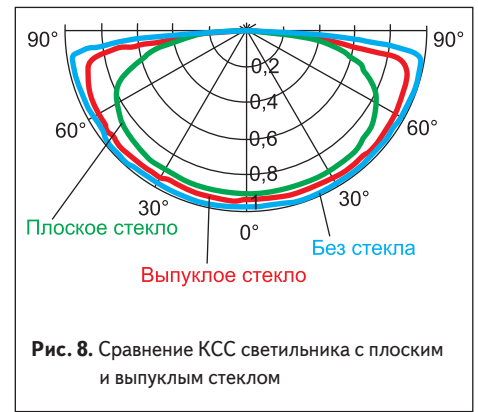


Рис. 8. Сравнение КСС светильника с плоским и выпуклым стеклом

поверхности с кривизной, отличной от нуля, приводит к появлению оптической силы, что обязательно изменит распределение силы света. Оценим это на модели, представленной ниже (рис. 7).

На графике (рис. 8) синим цветом показаны КСС светильника с плоским стеклом и без стекла, красным цветом — светильника с выпуклым стеклом. Таким образом, использование выпуклого стекла улучшает ситуацию, поскольку наличие кривизны приводит к уменьшению угла падения света на границу «воздух–стекло» (рис. 1) и, следовательно, снижению коэффициентов отражения. При создании экрана такой формы, чтобы в каждой его точке лучи света падали перпендикулярно, теоретически можно полностью исключить влияние экрана на светораспределение СП.

### Светильник с различными защитными экранами

В предыдущих примерах мы рассматривали упрощенную модель светильника — ИС с защитным экраном. В заключение представим исследование светодиодного светильника с двумя различными формами защитного экрана и учтем влияние корпуса на КСС СП. На рис. 9 представлен исходный светильник и два типа профиля стекла. На рис. 10 представлены КСС светильника с плоским стеклом, выпуклым и без.

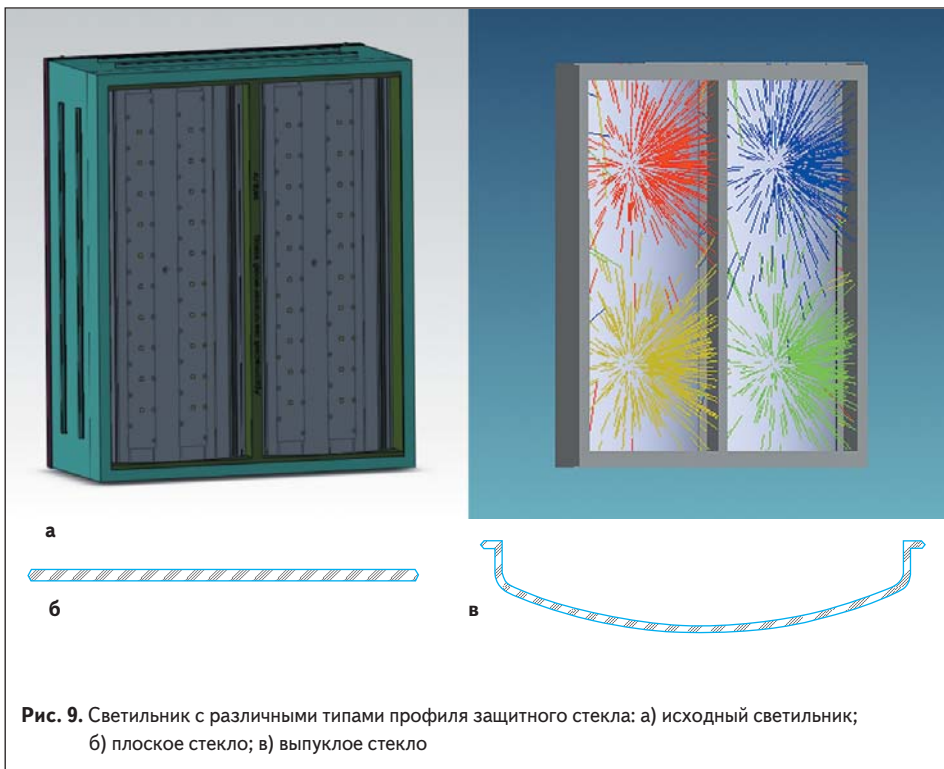


Рис. 9. Светильник с различными типами профиля защитного стекла: а) исходный светильник; б) плоское стекло; в) выпуклое стекло

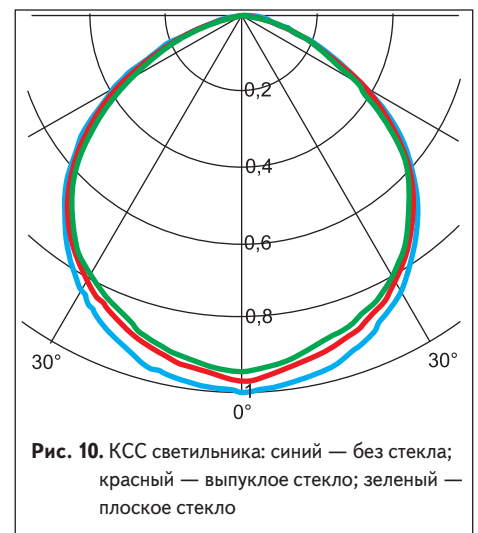


Рис. 10. КСС светильника: синий — без стекла; красный — выпуклое стекло; зеленый — плоское стекло

Потери светового потока в светильнике при отсутствии стекла составляют 21%. Это связано с тем, что светодиоды расположены в «глубине» прибора, и часть их светового потока поглощается и переотражается элементами конструкции. Общие потери составляют 29% при использовании выпуклого стекла и 30% в случае плоского.

В данном примере наличие экрана практически не оказывает влияния на форму КСС светильника, что согласуется со сделанным ранее выводом для углов излучения  $\alpha < \alpha_{\text{пво}}$ . Поэтому в данном случае форма экрана не важна: она может быть как плоская, так и выпуклая. Форма должна определяться исходя из эксплуатационных требований и возможностей конкретного производства.

Минимизация световых потерь — это важная задача при разработке светового прибора. Хотелось бы обратить внимание, что в рассмотренном примере на форму КСС влияет и конструкция самого светильника, которая оказывает большее влияние, чем защитный экран (21% против 8–9%). В данном случае исключить все потери невозможно, так как требуется обеспечить определенный защитный угол. Поэтому при разработке светильников важно оценивать всю систему в соответствии с назначением светового прибора с учетом всех требований к осветительным установкам.

## Заключение

В результате проделанной работы можно сделать следующие выводы:

- Для большинства случаев расчет светодиодных СП можно проводить без учета состояния поляризации.
- Если оптическая часть (источники света с вторичной оптикой или без) имеет угол излучения  $\alpha < \alpha_{\text{пво}}$ , то форма защитного экрана может быть как плоской, так и выпуклой; при углах  $\alpha \geq \alpha_{\text{пво}}$  рекомендуется применять выпуклые защитные экраны.
- На форму КСС влияет большое количество факторов: и геометрия, и тип материала экрана. Степень влияния зависит от источника света и угла излучения оптической системы. В некоторых случаях влияние геометрии экрана существенно меньше, чем влияние самого корпуса (высоты стенок), что говорит о необходимости поиска индивидуального оптимального решения при разработке СП.

## Литература

1. Ландсберг Г. С. Оптика. 5-е изд. М.: ФИЗМАТЛИТ. 1976.
2. Борн М., Вольф Э. Основы оптики / Пер. с англ., 2-е изд. М.: Наука. 1973.
3. Жевандров Н. Д. Поляризация света. М.: Наука. 1969.