

Антон Шаракшанэ | anton.sharakshane@gmail.com

Об эффективности матовых светорассеивателей

По сравнению с призматическими матовые светорассеиватели лучше выглядят в светильнике, сильнее выравнивают яркость выходного отверстия, но за это приходится платить более низким КПД оптической системы. Рассмотрим механизмы возникновения световых потерь в светильнике с матовым рассеивателем и пути их снижения.

Преломление, поглощение и два вида отражений

При прохождении через границу раздела сред свет преломляется и отражается (рис. 1) в соответствии с законом Снелиуса и формулами Френеля:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1},$$

$$R_s = \frac{\sin^2(\alpha - \beta)}{\sin^2(\alpha + \beta)},$$

$$R_p = \frac{\operatorname{tg}^2(\alpha - \beta)}{\operatorname{tg}^2(\alpha + \beta)},$$

где n_1 и n_2 — коэффициенты преломления сред, α и β — углы падения и преломления,

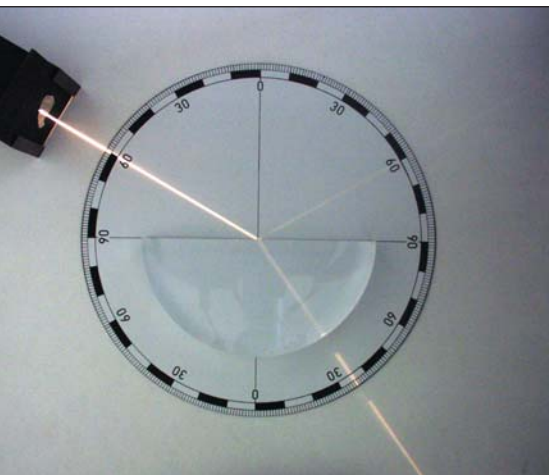


Рис. 1. Преломление и отражение света при прохождении через границу раздела сред (фотография с сайта www.fizkapu.hu, автор Zátonyi Sándor)

а R_s и R_p — коэффициенты отражения взаимно перпендикулярно поляризованных составляющих падающего луча.

Важно, что формулы Френеля описывают только преломление и отражение, но не поглощение, которого на границе раздела прозрачных диэлектриков нет. Поглощение преломленного луча происходит в толще прозрачной среды по закону Бугера:

$$I = I_0 e^{-kl},$$

где I_0 — интенсивность прошедшего в среду света, I — интенсивность света после прохождения толщины слоя l , а k — коэффициент поглощения.

Для типичных в светотехнике прозрачных материалов РРМА, РС, PS производство kl пренебрежимо мало и может не учитываться. Так, на примере поликарбонатов Macrolon поглощение в 1 мм толщии среды составляет 0,1–0,3% (таблица).

Однако в непрозрачных материалах луч, преломленный во вторую среду, не может пройти дальше очень тонкого слоя и частично поглощается, частично преобразуется во вторичное излучение, распространяющееся обратно в первую среду. Рекордные значения коэффициента отражения около 95% (порошок сульфата бария и некоторые виды анодированного алюминия марок Alanod и Anafol). В лучших практически значимых случаях от белых и зеркальных

материалов отражается до 90% падающего излучения, около 10% света теряется. Но обычно даже визуально белые материалы отражают лишь 70–80% излучения.

Отсутствие поглощения при преломлении, пренебрежимо малое поглощение при прохождении толщи прозрачных сред и значимое поглощение при отражении от непрозрачных сред позволяют сделать простой вывод: таких отражений в оптической системе светильника следует избегать.

Типы матовых светорассеивателей

Матировать прозрачные оптические материалы можно введением диффузатов принципиально разных типов — из отражающих и из преломляющих частиц. Типичный популярный диффузат с отражающими частицами — сульфат бария. Вариантов преломляющих матирующих агентов много, обычно это шитые акриловые структуры и алюмосиликаты. Какой использован в данном материале — узнать трудно. Производитель справедливо просит не вникать в тонкости его «кухни» и предлагает покупать готовый материал, при необходимости регулируя степень матовости смешением гранул матового материала с гранулами прозрачного.

Положенные на светлую подложку, изделия из матовых пластиков с разным типом диффузанта могут выглядеть одинаково под внешним освещением, то есть иметь одинаковый непрозрачный белесый цвет. Но стоит положить эти изделия на темную подложку, как пластик с преломляющим диффузатом начинает выглядеть значительно темнее, то есть его кроющая способность ниже.

Таблица. Поглощение в поликарбонатах Macrolon

Параметр	Macrolon OD2015	Macrolon LED2245	Macrolon AL2447 / AL2647	Macrolon LQ2647	Macrolon LQ3147 / 1821
Пропускание при толщине листа 4 мм, %	90	90	88	88	88
Пропускание при толщине листа 20 мм, %	88–89	88–89	83	83	83
Поглощение в толще 1 мм без учета отражения на границах, %	0,06–0,13	0,06–0,13	0,31	0,31	0,31

Примечание. Верхние строчки таблицы — данные из технической документации на поликарбонаты марки Bayer Macrolon, описывающие светопропускание монолитных листов толщиной 4 и 20 мм. Нижняя строчка — оценка доли светового потока поглощенного в 1 мм толщии среды, полученная как отношение разницы значений в первых двух строчках к разнице указанных толщин.



Рис. 2. Светодиодный модуль с диодами, установленными на разной высоте, и вид на этот модуль во включенном состоянии через два типа рассеивателей одинаковой толщины и одинакового внешнего вида под внешним освещением: с отражающим (по центру) и преломляющим (справа) диффузантами (для двух последних снимков геометрия сцены и настройки фотоаппарата в ручном режиме одинаковы)

Сильно различаются светорассеивающие свойства пластиков. Рассеиватель с преломляющим диффузантом, даже при слабой степени матовости, имеет высокую однородность яркости. Рассеиватель же из пластика с отражательным диффузантом должен иметь очень высокую концентрацию диффузанта и соответственно низкую оптическую эффективность, чтобы полностью «размазать» видимую яркость по своей поверхности. При умеренной степени матовости изображение на таком рассеивателе состоит из мягкого светового пятна, на котором отчетливо проступают яркие точки светодиодов. Причем видность этих точек почти не зависит от расстояния между светодиодами и рассеивателем (рис. 2).

Более низкой способности размывать по своей поверхности яркие пятна сопутствуют и более низкие значения оптического КПД светильника. Это обусловлено многократными отражениями лучей от частиц непрозрачного диффузанта — каждое отражение сопровождается небольшим поглощением. Преломляющие же частицы диффузанта отражают и преломляют без поглощения.

Досадно видеть в магазинах традиционные светильники, матовое покрытие колбы в которых обеспечено слоем белой краски изнутри плафона. Но светодиодные светильники с корректно выбранным материалом светорассеивателя на рынке уже появляются.

Борьба с потерями светового потока внутри светильника

Лучи света, попадая на пластиковую поверхность рассеивателя, проходят через границу раздела сред и частично от нее отражаются (рис. 1) в соответствии с формулами Френеля (рис. 3). Даже при падении под прямым углом на лист прозрачного пластика около 4% светового потока будет отражено. Чем больше угол падения, тем выше доля отраженного света.

Светотехнические материалы обычно испытывают на светопропускание только под прямым углом, но результаты этих измерений бесполезны. На практике под рассеивателем обычно стоит светодиод с косинусной КСС,

то есть лучи на рассеиватель падают под всеми углами от 0 до 90°.

Кроме того (рис. 4), свет испытывает множественные переотражения в самом рассеивателе, отражаясь от обеих границ раздела сред.

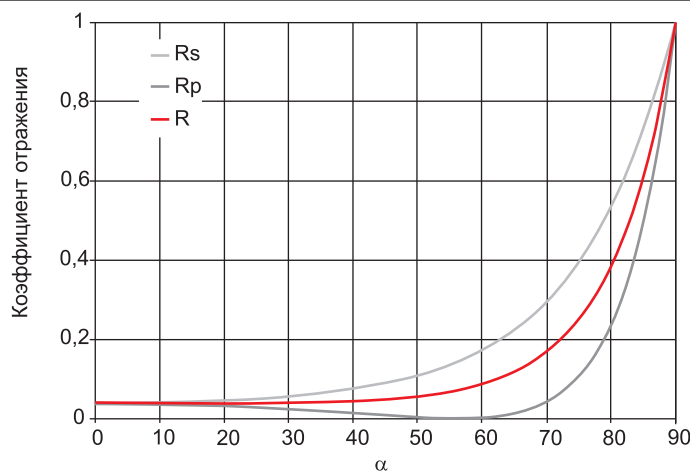


Рис. 3. Отражение от границы раздела сред при падении под различными углами в соответствии с формулами Френеля (красная кривая показывает полное отражение; точка слева, в которую сходятся все кривые, — 4% светового потока, отражаемые от листа прозрачного пластика при падении под прямым углом)

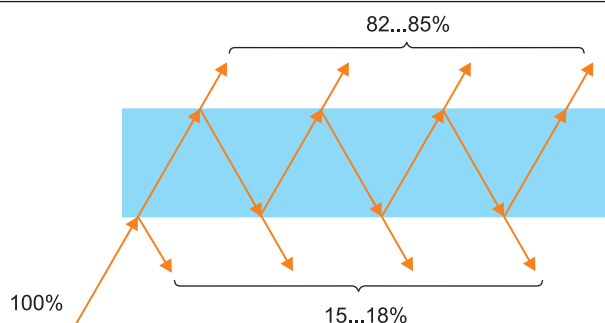


Рис. 4. Множественные отражения при прохождении светового луча через плоский прозрачный пластиковый лист

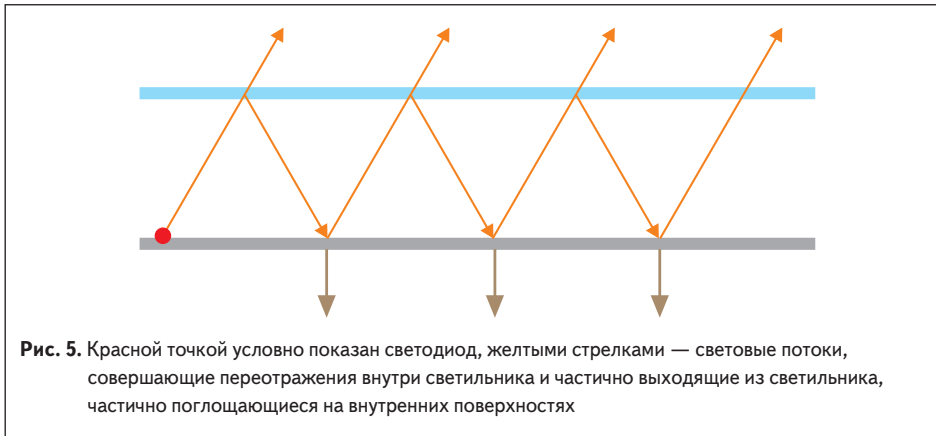


Рис. 5. Красной точкой условно показан светодиод, желтыми стрелками — световые потоки, совершающие переотражения внутри светильника и частично выходящие из светильника, частично поглощающиеся на внутренних поверхностях

Несложно подсчитать, какая доля светового потока от светодиода с косинусной КСС падает на рассеиватель под разными углами, посчитать и суммировать полное отражение. Для ПММА с коэффициентом преломления $n = 1,49$ суммарно отразится 15,3% светового потока, для поликарбоната и полистирола с коэффициентом преломления $n = 1,59$ составит 17,7%. Это значимые величины, особенно

если учесть, что речь идет об оптически прозрачном плоском материале. Если под плоский прозрачный плафон поставить светодиоды с диаграммой типа Ш, доля отраженного света вырастет еще сильнее.

Если бы внутренняя поверхность светильника была черной и поглощала весь падающий на нее свет, оптический КПД светильника с прозрачным плафоном составил бы 82–85%.

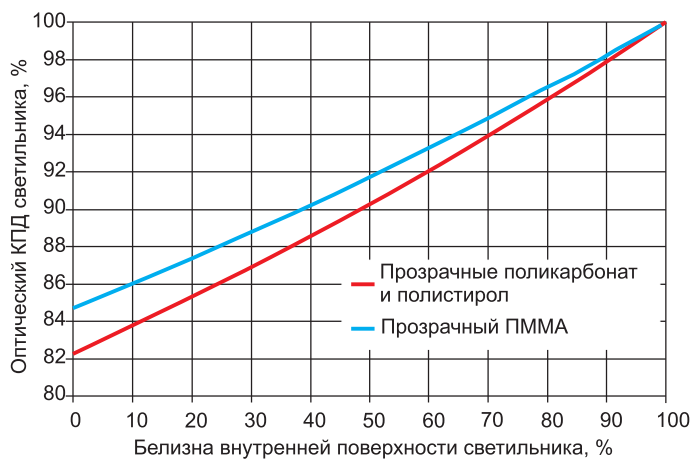


Рис. 6. Зависимость КПД оптической системы, состоящей из прозрачного плоского листа пластика, от средней белизны внутренней поверхности светильника

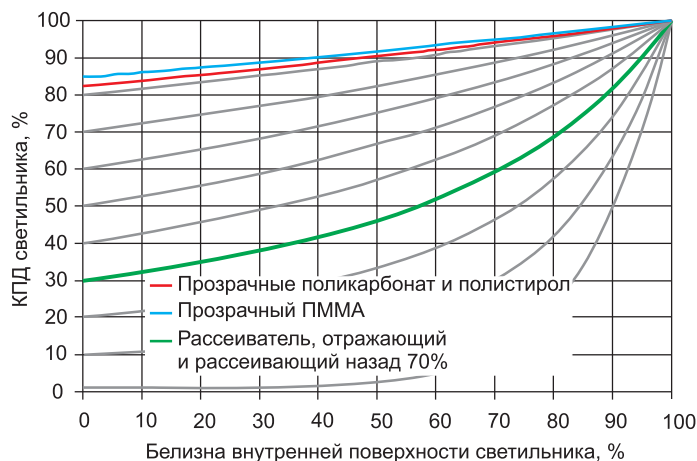


Рис. 7: Зависимость КПД оптической системы от средней белизны внутренней поверхности светильника и от доли светового потока, отражаемого и рассеиваемого в обратную сторону матовым рассеивателем

Но обычно средний коэффициент отражения внутренней поверхности светильника находится в диапазоне 50–90%. И часть отраженного света, совершив новый ряд переотражений, все же покидает светильник (рис. 5).

Для простоты расчетов будем считать, что вся внутренняя поверхность светильника параллельна плоскости рассеивателя и является матовой, то есть свет, падающий на нее в любую точку под любым углом, отражается по косинусной КСС. И посчитаем оптический КПД светильника для различных значений средней белизны внутренней поверхности (рис. 6). Видно, что увеличение белизны на 10% приводит к снижению потерь на ~2%. Это значимо, но за экстремально высокие значения коэффициентов отражения под прозрачным плафоном бороться нет смысла.

Работу матового рассеивателя в первом приближении описывает теория Кубелки-Мунка [1], созданная в 1930-х гг. для предсказания оптических свойств газетных бумаг и оперирующая соотношением коэффициентов поглощения и рассеяния K/S . По этой теории свет, падая на каждый из бесчисленных тонких слоев, составляющих толщу вещества, частично поглощается, частично проходит дальше и частично рассеивается в обратном направлении. Приятный момент заключается в том, что рассеяние в перпендикулярных лучу направлениях для узких лучей можно не учитывать и не обсчитывать. Несложные уравнения Кубелки-Мунка позволяют оценить общую долю света, прошедшую через мутную среду, поглощенную в ней и рассеянную в обратном направлении.

К сожалению, современные производители светотехнических материалов, в отличие от полиграфистов, не измеряют характеристики своей продукции достаточно дотошно и не предоставляют ни K/S и никакие другие параметры, позволяющие провести подобные расчеты. Поэтому в светотехнике теория Кубелки-Мунка оказывается полезной лишь терминологией и методологией. Но и этого достаточно, чтобы сделать нужные выводы: оптически толстые слои современных непрозрачных белых пластиков отражают 80%...90%, что соответствует крайне низкому соотношению коэффициентов поглощения и рассеяния K/S . Оптически тонкий слой белого пластика прозрачен и является рассеивателем, поглощая значительно меньше оптически толстого слоя. Смешивание при литье белого и прозрачного пластика одной марки приводит к тому, что оптически тонким становится конструктивно прочный слой толщиной в несколько миллиметров. Это и есть светотехнический рассеиватель с пренебрежимо малым внутренним поглощением. Следовательно, поглощением внутри типичного матового рассеивателя можно пренебречь!

Долю светового потока, рассеиваемого в обратную сторону, можно оценить, зная КПД оптической системы и степень белизны внутренних поверхностей с помощью диаграммы (рис. 7). На ней приведены значения оптического КПД светильника для всех значений белизны поверхности и величин общего отражения и рассеяния в обратном направлении на рассеивателе

в 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 и 99%. Взяв типичное значение КПД с опаловым рассеивателем 65% и оценив белизну внутренних поверхностей в 75%, мы получаем величину обратного отражения и рассеивания 70%.

Этот большой световой поток целесообразно как можно полнее вывести из светильника, увеличивая белизну внутренних поверхностей. По графикам видно, что увеличение белизны на 10% под данным рассеивателем приведет к изменению КПД на 10–15%. Чем выше степень матовости рассеивателя, тем больше роль белизны внутренних поверхностей. Причем с ростом белизны эффект от ее увеличения на каждый дополнительный 1% растет. Есть за что бороться!

Роль геометрии светорассеивателя

Увеличить равномерность яркости выходного отверстия светового прибора можно увеличением как числа светодиодов меньшей мощности, так и расстояния между светодиодами и рассеивателем. Как минимум это расстояние должно быть не меньше расстояния между светодиодами. Большее расстояние означает более высокую равномерность яркости, а следовательно, позволит снизить степень матовости рассеивателя и световые потери при прочих равных.

Перспективна комбинация матового материала и светорассеивающей текстуры поверхности. Кто сказал, что если поверхность имеет углубления в виде призм или полусфер, материал рассеивателя должен быть прозрачным? Добавление матирующего агента однозначно улучшит внешний вид и равномерность яркости выходного отверстия, и это позволит на следующем этапе снизить и концентрацию диффузанта и глубину штампованного рисунка.

В некоторых случаях возможен уход от плоской формы рассеивателя и значительное повышение оптического КПД за счет уменьшения площадей непрозрачных поверхностей, от которых свету придется отражаться. На рис. 8 приведен



Рис. 8. КПД оптической системы этой лампы составляет 90%, что было бы невозможно при плоской форме светильника с рассеивателем той же степени матовости

пример рассеивателя удачной формы — в нем отраженный и рассеянный обратно свет отправляется большей частью не на непрозрачные отражатели, а снова на рассеиватель. КПД оптической системы этой лампы составляет 90%, что является недостижимым идеалом для плоских светильников с рассеивателем той же степени матовости.

Контроль равномерности яркости

Для того чтобы соблюсти даже самые мягкие нормативы по габаритной яркости в 5000 кд/м², на 1 лм светового потока должно приходиться примерно 1 см² площади рассеивателя [2]. В некоторых светильниках площадь рассеивателя на порядок меньше этой нормы, а габаритная яркость на тот же порядок выше. В таких случаях степень неоднородности свечения ослепленным зрением различить невозможно, рассеиватель кажется однородно светящимся. Но это не значит, что такое решение приемлемо: ослепление

человека не может быть ни целью, ни средством при разработке светотехнического прибора. Картина неоднородности свечения рассеивателя при высокой средней яркости становится видной, если использовать защитные красные очки [3] или вместо слепящего рассеивателя смотреть на его отражение в оконном стекле.

Автор выражает благодарность за консультации и практическую помощь при подготовке материала Дмитрию Захарову, директору по науке ООО «Гамма-пласт».

Литература

1. Джадд Д., Вышецкий Г. «Цвет в науке и технике».
2. Шаракшанэ А. Минимальная площадь рассеивателя, при которой светильник не слепит // Современная светотехника. 2012. № 3.
3. Шаракшанэ А. Защита зрения при работе со светодиодами без рассеивателя // Полупроводниковая светотехника. 2012. № 6.