

Гладун Анатолий Деомидович

*Доктор физико-математических наук, профессор,
заведующий кафедрой общей физики Московского
физико-технического института (МФТИ).*

Главный редактор журнала.



Световозвращающие материалы

В статье обсуждаются типичные конструкции и физический принцип действия современных световозвращающих материалов, используемых в качестве средств пассивной сигнализации на транспорте и в других областях народного хозяйства.

Введение

Каждый, кто когда-либо изучал школьный учебник физики и задумывался над тем, как работают оптические приборы, такие, скажем, как микроскоп, телескоп, бинокль, фотоаппарат и т. п., помнит, конечно, основные законы лучевой (геометрической) оптики. К их числу относятся, как известно, закон прямолинейного распространения света, закон независимости световых пучков, закон отражения света от зеркал, законы преломления света. Эти законы в современной формулировке были известны ещё Платону (430 г. до н. э.).

Особенное внимание исследователей уделялось и уделяется поныне закону отражения света: ведь без преувеличения можно сказать, что большую часть информации об окружающих нас предметах мы получаем из того, как они отражают свет. Мы часто говорим: «Угол падения равен углу отражения». Иногда этой фразе придаём метафорическое и даже философское звучание. Всегда ли, однако, это верно? Можно ли, например, создать конструкцию, которая отра-

жала бы свет в направлении, обратном направлению падающего света, т. е. возвращала свет к источнику?

Чтобы ответить на эти и другие аналогичные вопросы, необходимо прежде всего определить, какой смысл вкладываем мы в слова «отражение света». Строго говоря, эти слова принадлежат геометрической оптике. Но как создать световозвращающие поверхности? Ведь они могли бы быть важными элементами системы безопасности нашей жизнедеятельности. Это подсказывает сама Природа. Живое существо не имеет более верного и сильного защитника, чем глаз. Видеть – значит определять детали окружения и отличать врагов от друзей. Вспомним хотя бы глубоководных рыб. Казалось бы, эти рыбы должны быть безглазыми, ведь свет почти не проникает на большие глубины. В действительности это не так. Большинство глубоководных рыб имеют глаза и притом (в относительном рассмотрении) самые большие в мире позвоночных. Глаза их, по-видимому, самые чувствитель-

ные среди животных, что обеспечивает зрительное восприятие слабых следов света на значительных морских глубинах.

Более того, глубоководные морские рыбы сами способны производить свет, немного освещать окружающее и становиться видимыми для других зрячих животных. Они обладают поэтому люминесцирующими органами, находящимися около глаз или на других местах тела. Свечение таких органов происходит за счёт окисления и служит маленьким маяком для рыб, освещая им путь и встречные тела. Значительная часть света, попадающая на другую рыбу, возвращается при этом в глаз излучающей рыбы. Нетрудно понять, что световозвращающая поверхность должна состоять из элементарных световозвращателей, размер которых велик по сравнению с длиной волны света и мал по сравнению с размером отражающей поверхности. Таким образом, задача сводится к созданию набора элемен-

тарных световозвращателей, расположенных в одной плоскости. Это вполне осуществимо в настоящее время.

В данной статье мы рассказываем о том, что представляют собой современные световозвращающие материалы и каков их принцип действия.



Простейшая световозвращающая конструкция

Начнём с описания, пожалуй, самой простой светоотражающей конструкции. Это обычный уголкового отражатель. Принцип действия такого отражателя основан на простейшей геометрической оптике, а устройство настолько элементарно, что каждый из читателей может сделать его даже в домашних условиях.

Для этого нужно только собрать из трёх взаимно перпендикулярных плоскостей трёхгранный угол. При падении луча света на такую конструкцию он отражается от неё в строго противоположном направлении (рис. 1). На этом принципе основано действие катафотов, которые уста-

навливают на велосипеды и автомобили для того, чтобы последние были хорошо видны в отражённом свете фар.

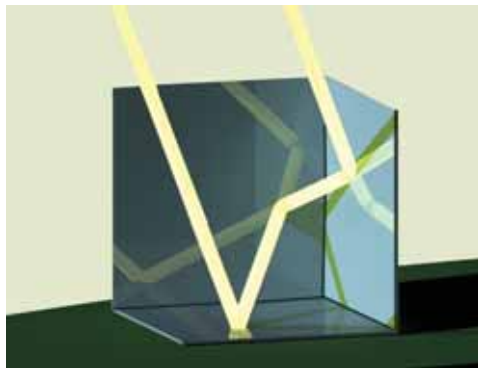


Рис. 1

Световозвращающие плёнки

Несмотря на очевидную простоту уголкового отражателя, его практи-

ческое использование не всегда возможно. К примеру, если светоотра-

жающей нужно сделать поверхность, форма которой может изменяться. Для этой цели могут служить гибкие световозвращающие плёнки. Элементарной ячейкой таких плёнок является линза с зеркалом в фокальной плоскости. Рассмотрим ход луча $abcd$ в такой системе (см. рис. 2). Как видно из рисунка, этот луч отражается в направлении источника света в полном соответствии с правилами геометрической оптики.

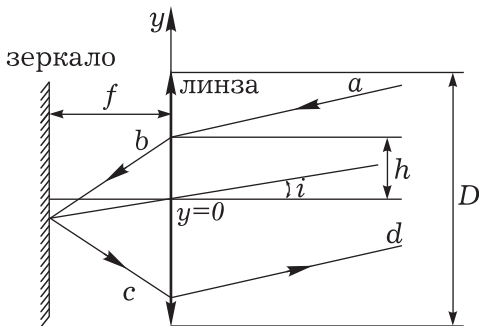


Рис. 2

Теперь рассмотрим устройство конкретных плёнок, работающих на этом принципе. В них роль линз выполняют стеклянные шарики (см. рис. 3).

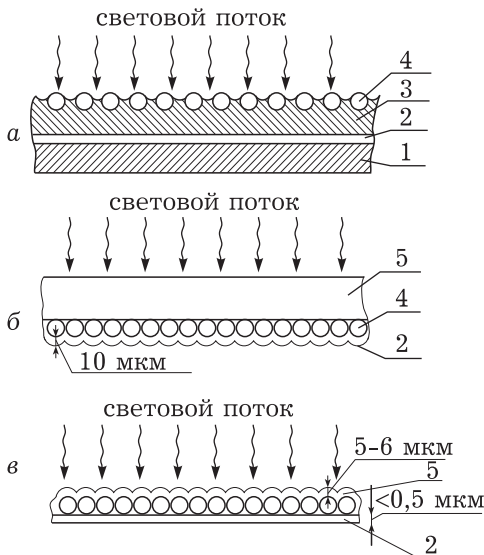


Рис. 3

На рис. 3 а представлен один из первых вариантов световозвращающих конструкций. На подложку 1, несущую отражающий слой 2, нанесён прозрачный слой связующего 3, в котором расположен монослой мельчайших стеклянных шариков 4, вдавленных в слой связующего на определённую глубину. Опытным путём было установлено, что оптические характеристики световозвращения очень сильно зависят от расстояния нижней кромки шариков до отражающего слоя. Это вполне объяснимо на основе сказанного выше. При показателе преломления материала шариков $n=1,50-1,55$ опти-

мальное расстояние составляет $\frac{1}{3}$ диаметра шариков. Шарики при этом имеют размеры в диапазоне 3-50 мкм.

Этот вариант структуры, в котором верхние полусферы шариков выступают над плёнкой, обладает, однако, существенными недостатками. Во-первых, её оптические свойства очень сильно зависят от влажности воздуха, поскольку показатель преломления воды отличен от показателя преломления воздуха. Во-вторых, шероховатая поверхность такой плёнки в большой степени подвержена загрязнению.



На рис. 3 б и 3 в приведены типичные структуры современных

конструкций световозвращающих материалов. В обеих конструкциях используется защитный слой 2, в случае, показанном на рис. 3 б, это лавсановая плёнка, в случае, изображённом на рис. 3 в, — лаковый слой. В структуре, которая показана на рис. 3 б, отражателем является напылённый слой алюминия, в

структуре рис. 3 в — алюминиевая фольга. Возможны, естественно, совершенно другие конструкции.

Таким образом, световозвращающий материал — это многослойная плёнка с тонкой структурой. К нужному объекту она приклеивается с помощью соответствующих клеящих материалов.

Дальность видимости световозвращающего знака

Определим, какими физическими величинами обусловлена дальность видимости световозвращающего знака. Возвращаемый световой поток практически сосредоточен внутри конуса, половинный угол раствора которого равен угловой полуширине световозвращения ψ (см. рис. 4). Соответствующий телесный угол

$$\omega = 4\pi \cdot \sin^2 \frac{\psi}{2} \approx \pi \cdot \psi^2.$$

Если сила света источника в данном направлении I , расстояние

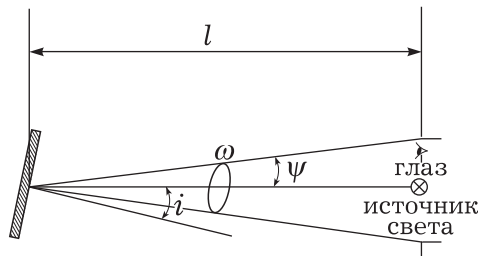


Рис. 4

от источника до знака l , площадь знака S , угол освещения i , то падающий на знак световой поток

$$F = a \cdot \frac{I \cdot S \cdot \cos i}{l^2}.$$

Коэффициент a учитывает здесь потери в атмосфере. Сюда входит вся совокупность факторов, которые могут уменьшить прозрачность атмосферы. Среди них рассеяние на пыли, тумане и пр.

Отражённый от знака световой поток характеризуется силой света, которая, очевидно, равна

$$I = \eta_i \frac{F}{\omega}.$$

Величину η_i можно назвать при этом коэффициентом полезного действия материала для угла освещения i . Для освещённости зрачка глаза наблюдателя имеем:

$$E = a \cdot \frac{\eta_i \cdot F}{\omega \cdot l^2} = \frac{a^2 \cdot \eta_i \cdot I \cdot S \cdot \cos i}{\omega \cdot l^4}.$$

Приравнивая последнюю величину пороговой освещённости в данном диапазоне спектра $E_{\text{пор}}$, находим

$$l = \left(\frac{a^2 \cdot \eta_i \cdot I \cdot S \cdot \cos i}{\pi \cdot \psi^2 \cdot E_{\text{пор}}} \right)^{\frac{1}{4}}.$$

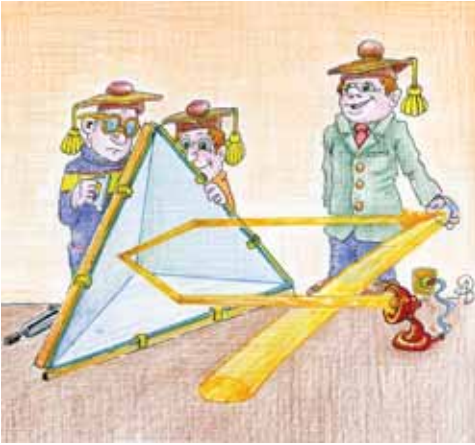
Знак при этом будет виден в круге, диаметр которого

$$D \approx 2l \cdot \psi.$$

Сделаем численные оценки. Оценим вначале силу света автомобильной фары. В такой фаре обычно используется лампа накаливания мощностью 40 Вт. Телонити накала лампы изготовлено из вольфрама. Теоретически достижимая световая отдача вольфрама составляет величину около 50 лм/Вт, практически получена величина 35–40 лм/Вт. Световой поток такого источника можно считать, таким образом, равным

$$35 \text{ лм/Вт} \cdot 40 \text{ Вт} = 1400 \text{ лм}.$$

Пусть половинный угол расхождения пучка «дальнего света» равен 15 град $\approx 0,26$ рад. Соответствующий телесный угол есть



$$\pi(0,26)^2 \approx 0,2 \text{ стерад.}$$

Следовательно, сила света в направлении освещения равна

Эффективное сечение рассеяния назад

Световозвращающий материал состоит из большого числа элементарных сферических или плоскогранных световозвращателей. В силу этого при теоретическом рассмотрении материала целесообразно использовать хорошо известное в теории элементарных процессов понятие эффективного сечения рассеяния. Дело в том, что если на светотражающую конструкцию площадью S падает световой пучок под углом i , то он будет эффективно отражаться не всей площадью S ,

$1400 \text{ лм}/0,21 = 6600 \text{ кд}$.
Полагаем, что $a = 1$; $\eta_i = 0,01$; $i = 0$;
 $S = 0,25 \text{ м}^2$; $I = 10^4 \text{ кд}$; $E_{\text{пор}} = 2 \cdot 10^{-7} \text{ лк}$
(белый знак). Имеем:

$$l^4 = 6 \cdot 10^8 \text{ м}^4; l \approx 160 \text{ м.}$$

Отметим, что для увеличения дальности видимости знака в два раза необходимо увеличить КПД световозвращения в 16 раз или уменьшить угол световозвращения в 4 раза. Таким образом, хорошие светотражающие конструкции должны обладать высоким КПД световозвращения. Попробуем разобраться в этом понятии более подробно и выяснить, от чего оно зависит.

а только лишь какой-то её частью σ . Причём площадь этой части будет зависеть от угла падения. Поэтому целесообразно обозначить её через σ_i . Это и есть хорошо известное в теории элементарных процессов понятие эффективного сечения рассеяния. В таком случае очевидно, что отражённый световой поток будет слабее падающего в $\frac{\sigma_i}{S}$ раз. Это отношение и будет являться КПД световозвращения $\eta_i = \frac{\sigma_i}{S}$.

Геометрическая оптика системы линзы и зеркала

Проиллюстрируем теперь описанные выше понятия эффективного сечения рассеяния и КПД световозвращения на примере уже знакомого нам световозвращающего элемента, состоящего из линзы и зеркала (см. рис. 2).

Рассмотрим луч $abcd$, падающий на линзу под углом i . Если ордината точки b равна h , то ордината точки d есть

$$y = -(h + 2f \cdot \text{tgi}),$$

где f — фокусное расстояние линзы. Полагая

$$y = -\frac{D}{2},$$

$$\text{находим } h_{\text{max}} = \frac{D}{2} - 2f \cdot \text{tgi}.$$

Эффективное сечение световозвращения при этом есть

$$\sigma_i = \pi h_{\text{max}}^2 = \frac{\pi D^2}{4} \cdot \left(1 - \frac{\text{tgi}}{\text{tgi}_{\text{пр}}}\right)^2,$$



где

$$\operatorname{tgi}_{\text{тр}} = \frac{D}{4f}.$$

Следовательно, КПД

$$\eta_i = \left(1 - \frac{\operatorname{tgi}}{\operatorname{tgi}_{\text{тр}}}\right)^2.$$

Если проанализировать последние две формулы, то можно прийти к выводу, что для увеличения КПД нужно, чтобы фокус линзы был минимален. Отчасти именно поэтому в реальных материалах в качестве линз используются мелкие стеклянные шарики. Другим важным плюсом является то, что стеклянные шари-

ки изготовить технологически легче, чем линзы в форме чечевицы.



Заключение

В современной жизни широко используются различные полимерные покрытия. Они выполняют в основном защитные, декоративные или защитно-декоративные функции. В последние годы, однако, непрерывно возрастает роль покрытий, выполняющих более тонкие функции. Речь идёт, например, о ферролаковых, терморегулирующих и других системах. К числу последних относятся также световозвращающие покрытия. Они наносятся обычно на тонкие плёнки, которые затем приклеиваются к нужному объекту. Световозвращающие покрытия возвращают назад к источнику часть светового потока, достаточную для того, чтобы использовать их в качестве средств пассивной сигнализации на транспорте и в других областях народного хозяйства.

Характерные фотометрические свойства таких материалов определяются тонкими деталями в структуре покрытия. Технология изготовления световозвращающих материалов по-

этому значительно сложнее традиционной лакокрасочной технологии. Она относится к так называемым тонким технологиям, осуществление которых возможно лишь на основе глубокого знания физики и химии конденсированного состояния вещества.



Литература

1. Слюсарев Г.Г. О возможном и невозможном в оптике. – М.: Физматгиз, 1960 г.
2. Вавилов С.И. Глаз и Солнце. – М.: Наука, 1981 г.