

УДК 535.241.5

**В. В. Петров, С. М. Шанойло, А. А. Крючин,
Е. Е. Антонов, В. Г. Кравец**

Институт проблем регистрации информации НАН Украины
ул. Н. Шпака, 2, 03113 Киев, Украина

Моделирование свойств асимметричных световозвращающих элементов

Проведен анализ геометрических и светотехнических характеристик асимметричных световозвращающих элементов. Предложена методика расчета параметров таких элементов. Определены оптимальные соотношения геометрических размеров элементов, обладающих максимальным световозвращением при заданном угле освещения.

Ключевые слова: *световозвращающий элемент, угол освещения, коэффициент отражения, эффективная поверхность.*

Для ряда технических приложений (дорожные знаки, световозвращающие ленты, маркеры для автодорог) требуются световозвращающие элементы, обладающие максимальной эффективностью для определенного заранее заданного угла освещения в широком угловом диапазоне (35–60 градусов). Например, дорожные разметочные вставки устанавливаются под углом $\alpha = 30^\circ$ к полотну дороги, и необходимо оптимизировать их светотехнические характеристики именно для этого рабочего угла.

Подобные световозвращающие структуры находят все большее применение для оснащения автомобильных путей и магистралей, при этом в связи с ростом интенсивности движения предъявляются высокие требования к их световым характеристикам. Для создания таких элементов необходимо выработать теоретический подход, который позволил бы при существующей технологической и технической оснащенности создавать современные высокоэффективные световозвращающие элементы.

Задача, решаемая в настоящей работе, может быть разделена на две части: а) разработка теоретической модели асимметричного световозвращающего элемента, которая позволяет произвести оптимизацию его геометрических параметров; б) создание высокоэффективных световозвращающих элементов с использованием разработанного технологического оснащения на основе расчетных характеристик элементов. В работе приводятся как теоретические, так и экспериментальные результаты исследований, а также осуществляется детальный их анализ.

© В. В. Петров, С. М. Шанойло, А. А. Крючин, Е. Е. Антонов, В. Г. Кравец

Расчетная модель

Рассмотрим угловой асимметричный микропризмный отражатель [1], обладающий максимальным светоотражением именно при больших углах освещения, у которого трехгранная микрокубическая световозвращающая структура формируется тем или иным способом на образующей поверхности двумя сериями взаимно перпендикулярных канавок. Одна из канавок имеет угол 90° , а другая изготавливается таким образом, что одна ее стенка перпендикулярна к образующей поверхности, а вторая стенка расположена наклонно под острым углом $\alpha = 20\text{--}35^\circ$ от нормали к поверхности. Световозвращение обеспечивается, как правило, за счет принципа полного внутреннего отражения. Под оптимизацией таких асимметричных световозвращающих элементов (катафотов) будем понимать разработку структур, которые обладают для заданного угла освещения максимально возможным коэффициентом активной апертуры или, так называемой, эффективной поверхностью, т.е. отношением площади рабочей зоны S к общей площади его поверхности S_0 .

Схема такого единичного асимметричного элемента приведена на рис. 1. Здесь L и W — шаг серий узких и широких канавок соответственно; D — глубина канавок. Будем рассматривать наиболее часто реализующийся случай освещения элемента световым потоком Φ_0 вдоль направления широкой канавки под углом φ_0 к образующей поверхности $A_1A_2C_2C_1$. Угол φ_0 отсчитывается от нормали к поверхности и называется углом освещения световозвращающего элемента, как это принято в светотехнике, или углом падения луча, как это принято в оптике. Часть света отразится от образующей поверхности с коэффициентом отражения k_{refl} , а другая его часть пройдет внутрь элемента с коэффициентом k_{trans} . Угол преломления луча света φ_1 внутри элемента для любого заданного угла освещения φ_0 можно определить с помощью закона преломления света [2]:

$$n_0 \sin \varphi_0 = n_1 \sin \varphi_1, \quad (1)$$

где n_0 и n_1 — коэффициенты преломления света для первой и второй сред.

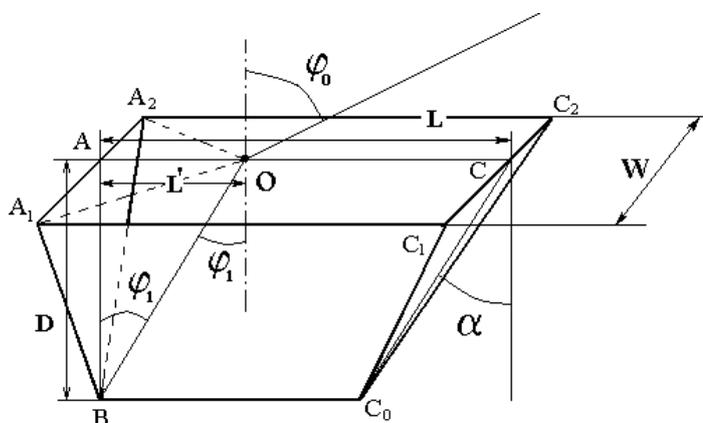


Рис. 1. Единичный световозвращающий элемент асимметричного типа

При определении площади рабочей зоны $S = WL$ световозвращающего элемента будем исходить из того, что каждому углу освещения элемента φ_0 и углу преломления φ_1 соответствует проекция A_1A_2O отражающей грани A_1A_2B на образующую поверхность в направлении φ_1 (рис. 1). Лучи света, которые проходят из воздуха внутрь катафота и пересекают проекцию A_1A_2O , после отражения от трех взаимно перпендикулярных граней $A_1BC_0C_1$, $A_2BC_0C_2$ и A_1A_2B выйдут из световозвращающего элемента под теми же углами φ_1 и φ_0 , то есть возникнет «катафотный» эффект. Ясно, что лучи, которые параллельны рассмотренным и проходят симметрично относительно точки O через зону зеркального отражения грани A_1A_2B от двух боковых граней $A_1BC_0C_1$ и $A_2BC_0C_2$, также испытают «катафотный» эффект. Аналогичным образом происходит и световозвращение для лучей, отражающихся вначале от боковых граней, а затем от торцевой грани A_1A_2B .

Отсюда можно определить условие оптимальности световозвращающего элемента, когда все лучи, попавшие на его образующую поверхность, развернутся в обратном направлении. Для заданного угла падения φ_0 величина рабочей зоны асимметричного катафота $S = WL$ в проекции на образующую поверхность в направлении φ_1 определится с учетом соотношения (1) следующим образом:

$$S = WL = 2 WD \operatorname{tg} \varphi_1 = 2 WD \operatorname{tg} (\sin^{-1}((\sin \varphi_0)/1,585)). \quad (2)$$

Выражение (2) соответствует случаю, когда микропризмный рельеф непосредственно граничит с воздухом, т.е. величина $n_0 = 1,0$, а значение $n_1 = 1,585$, поскольку световозвращающие элементы рассматриваемого типа чаще всего изготавливают из поликарбоната. Тогда поток света Φ_0 , падающий на границу раздела сред «воздух–поликарбонат» под углом φ_0 , будет распространяться внутри элемента под углом $\varphi_1 = \sin^{-1}((\sin \varphi_0)/1,585)$.

Учитывая, что угол широкой канавки составляет 90° и шаг $W = 2D$, из (2) можно получить:

$$L/W = \operatorname{tg} (\sin^{-1}((\sin \varphi_0)/1,585)). \quad (3)$$

Таким образом, для каждого угла освещения φ_0 можно установить оптимальное соотношение L/W между шагами серий широких и узких канавок асимметричного световозвращающего элемента, при котором величина его рабочей зоны S^* максимальна ($S^* = S_0$), и коэффициент активной апертуры S/S^* составляет 100 %, что является теоретическим пределом эффективности световозвращения.

Оптимизация геометрических параметров световозвращающих элементов

Теоретически полученные соотношения между шагами серий узких и широких канавок позволяют провести оптимизацию геометрических параметров асимметричного световозвращателя для набора рабочих углов. График зависимости (3)

приведен на рис. 2. Для наиболее интересного с точки зрения практического применения угла освещения $\varphi_0 = 60^\circ$, который реализуется для дорожных катафотов, максимальная величина $S/S^* = 100\%$ соответствует значению $L/W = 0,6525$. Другими словами, для соотношения $L/W = 0,6525$ угол оптимизации φ_0^* , соответствующий максимальному световозвращению, составляет 60° . При больших значениях L/W часть света будет проходить через световозвращающий элемент только после двух отражений от боковых граней световозвращающего элемента без «катафотного» эффекта. При меньших значениях L/W часть рабочей зоны будет экранироваться верхним ребром узкой канавки, и поток света после внутреннего отражения от всех трех граней элемента будет рассеиваться внутри катафота, уменьшая тем самым эффективность световозвращения.



Рис. 2. Соотношение между L и W , при котором коэффициент активной апертуры $S/S^* = 100\%$ для системы «поликарбонат–воздух»

Грань $C_0C_1C_2$ световозвращающего элемента является нерабочей, однако, угол α между этой гранью и вертикальной торцевой гранью A_1A_2B должен быть меньше угла φ_1 , потому что в противном случае часть площади рабочих боковых поверхностей будет экранироваться этой наклонной гранью.

В общем случае зависимость коэффициента активной апертуры (эффективной поверхности) S/S^* от угла освещения φ_0 для элемента, который оптимизирован для какого-либо угла освещения φ_0^* , определится с учетом (3) следующим образом:

1) для $L^* < L$:

$$S(\varphi_0)/S^* = L/L^* = \operatorname{tg}(\sin^{-1}((\sin \varphi_0)/1,585)) / \operatorname{tg}(\sin^{-1}((\sin \varphi_0^*)/1,585));$$

2) для $L^* > L$:

$$S(\varphi_0)/S^* = L^*/L = \operatorname{tg}(\sin^{-1}((\sin \varphi_0^*)/1,585)) / \operatorname{tg}(\sin^{-1}((\sin \varphi_0)/1,585)).$$

(4)

График функции (4) приведен на рис. 3 для элементов, оптимизированных для различных углов освещения φ_0^* .

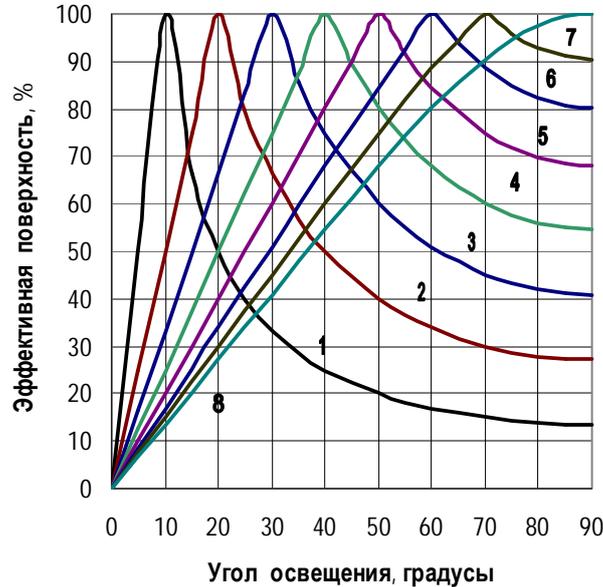


Рис. 3. Зависимость эффективной поверхности элемента S/S^* от угла освещения φ_0 для угла оптимизации $\varphi_0^* = 10^\circ$ (кривая 1), 20° (2), 30° (3), 40° (4), 50° (5), 60° (6), 70° (7) и 90° (8)

Полученные соотношения (4) позволяют вычислить оптимальную эффективную поверхность элемента $S(\varphi_0)/S^*$ в зависимости от угла освещения φ_0 . Далее можно установить взаимосвязь между эффективной поверхностью и коэффициентом световозвращения элемента $R(\varphi_0)$, который определяется следующим образом:

$$R(\varphi_0) = A_0 \cos(\varphi_0) k_{trans}(\varphi_0) S(\varphi_0)/S^*, \quad (5)$$

где $A_0 = 2750$ кд/(лк·м²) — нормировочный множитель, учитывающий связь между освещенностью поверхности и световозвращением, который был установлен экспериментально; $\cos(\varphi_0)$ учитывает изменение освещенности единичной площадки при наклоне поверхности на угол φ_0 к направлению светового потока Φ_0 ; $S(\varphi_0)/S^*$ — эффективная поверхность элемента, определенная согласно (4); коэффициент пропускания света $k_{trans}(\varphi_0)$ через образующую поверхность элемента можно рассчитать по формулам Френеля [3]:

$$k_{trans}(\varphi_0) = 1,0 - 0,5(\sin^2(\varphi_0 - \varphi_1)/\sin^2(\varphi_0 + \varphi_1) + \text{tg}^2(\varphi_0 - \varphi_1)/\text{tg}^2(\varphi_0 + \varphi_1)). \quad (6)$$

При этом считалось, что преломленный луч света испытывает полное внутреннее отражение от отражающих граней элемента, что полностью справедливо

для рассматриваемого случая. Также полагалось, что поглощение света внутри элемента несущественно, т.е. $k_{trans} + k_{refl} = 1,0$. Графики зависимости (5) для различных углов оптимизации $(\varphi_0)^*$ приведены на рис. 4.

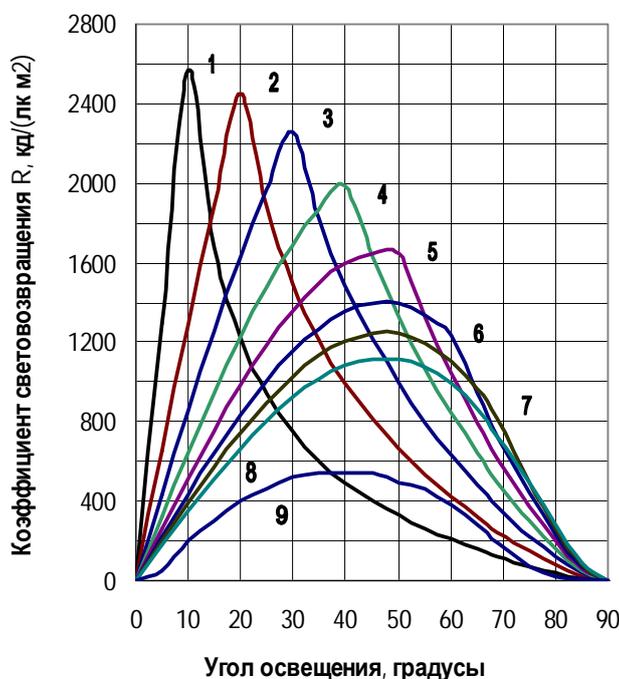


Рис. 4. Коэффициент световозвращения для углов оптимизации $\varphi_0^* = 10^\circ$ (кривая 1), 20° (2), 30° (3), 40° (4), 50° (5), 60° (6), 70° (7) и 90° (8). Кривая 9 — эксперимент ИПРИ НАН Украины для системы «поликарбонат–воздух» при условии $L/W = 0,73$

Отметим, что на рис. 4 для одного из режимов приведены как теоретическая (кривая 7), так и экспериментальная (кривая 9) зависимости. Сопоставление рассчитанных согласно (5) значений с экспериментальными данными, полученными в Институте проблем регистрации информации НАН Украины, показывает, что расчетная модель качественно правильно описывает наблюдаемые явления. Количественное же различие кривых 7 и 9 (рис. 4) объясняется несовершенством оптических рабочих поверхностей реальных световозвращающих элементов вследствие наличия на них дефектов, возникающих при формировании на подложке микрорельефной структуры.

Учет экранирования микрорельефа

В предыдущем разделе в модели оптимизации световозвращающих элементов рассматривались только их геометрические характеристики. С практической точки зрения необходимо также учесть влияние технологических процессов изготовления световозвращателей.

В случае, когда микропризмный рельеф наносится на образующую поверх-

ность световозвращающего элемента методом, так называемого «алмазного» резания [4], существуют дополнительные требования к углу заточки режущего инструмента, а именно, режущий угол α резца, который используется для формирования узкой канавки асимметричного катафота, оптимизированного для какого-либо угла $(\varphi_0)^*$, не должен превышать соответствующий угол $(\varphi_1)^*$. Если же по каким-либо техническим причинам невозможно изготовить резец с достаточно острым углом и величина α больше угла φ_1 , а нарезка узких канавок производится для углов оптимизации, определенных согласно (2), то в этом случае возникают дополнительные потери световозвращения.

Рассмотрим случай, когда вершина резца с углом $\alpha > \varphi_1^*$ касается ребра C_1C_2 (рис. 1). В этом случае часть боковых рабочих поверхностей катафота вообще не может быть сформирована таким резцом. Площадь этой зоны S_1 в проекции на поверхность $A_1A_2C_2C_1$ в направлении φ_1^* составляет величину $WD(\operatorname{tg}\alpha - \operatorname{tg}\varphi_1)/2$. Тогда соответствующий коэффициент уменьшения (экранирования) k_1 рабочих поверхностей катафота с учетом выражения (2) определится:

$$k_1 = (S^* - S_1)/S^* = (3\operatorname{tg}\varphi_1^* - \operatorname{tg}\alpha)/2\operatorname{tg}\varphi_1^*. \quad (7)$$

Учитывая этот дополнительный коэффициент k_1 , можно вычислить эффективную поверхность элемента S/S^* согласно соотношению (4) с учетом экранирования (7). Для резца с рабочим углом $\alpha = 36^\circ$, который является оптимальным по ряду соображений, графики величины S/S^* (4) с учетом экранирования (7) приведены на рис. 5.

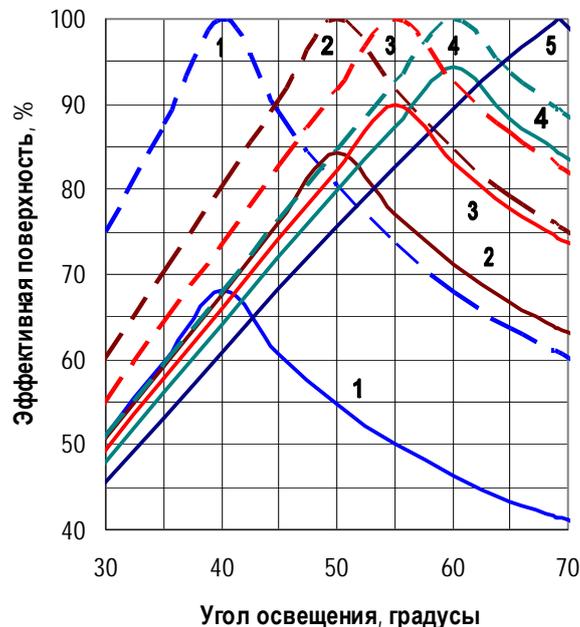


Рис. 5. Эффективная поверхность S/S^* в зависимости от угла освещения φ_0 для угла оптимизации $\varphi_0^* = 40^\circ$ (кривая 1), 50° (2), 55° (3), 60° (4) и $69,1^\circ$ (5): сплошная линия — угол резца $\alpha = 36^\circ$; пунктир — угол α согласован с углом φ_1^*

В другом случае, когда режущая грань резца с углом $\alpha > \varphi_1^*$ касается точки C_0 (рис. 1), во время нарезки микрорельефа на образующей поверхности $A_1A_2C_2C_1$ формируется дополнительная зона $S_2 = WD(\operatorname{tg}\alpha - \operatorname{tg}\varphi_1^*)$, и создаются две дополнительные зоны на боковых рабочих поверхностях катафота, которые не являются рабочими для заданного согласно выражению (2) угла оптимизации φ_1^* . Для этого случая дополнительный коэффициент k_2 уменьшения эффективной поверхности S/S^* равен:

$$\begin{aligned} k_2 = S^*/(S^* + S_2) &= 2 WD \operatorname{tg} \varphi_1^* / (2 WD \operatorname{tg} \varphi_1^* + (WD (\operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} \varphi_1^*))) = \\ &= 2 \operatorname{tg} \varphi_1^* / (\operatorname{tg} \varphi_1^* + \operatorname{tg} \alpha). \end{aligned} \quad (8)$$

Отметим, что для резца с фиксированным острым углом α существует минимальный шаг нарезки $L_{\min} = D \operatorname{tg} \alpha$, меньше которого нарезка на полную расчетную глубину физически невозможна. Например, при $D = 185$ мкм для резца с углом $\alpha = 36^\circ$ этот шаг $L_{\min} = 134,4$ мкм. Максимальный же шаг нарезки L_{\max} определяется предельным углом преломления $(\varphi_1)_{\max}$, который соответствует направлению распространения потока света Φ_0 вдоль образующей поверхности катафота $A_1A_2C_2C_1$. Для системы «поликарбонат–воздух» угол $(\varphi_1)_{\max} = \sin^{-1}(\sin(90^\circ))$: $:1,585 = 39,1^\circ$, и максимальный шаг $L_{\max} = 300,9$ мкм. Нарезка с шагом $L > L_{\max}$ не имеет смысла, поскольку в этом случае часть поверхности катафота становится нерабочей.

Проведенный анализ показал, что асимметричные катафоты имеют существенное преимущество перед прямыми (симметричными) по коэффициенту активной апертуры. Однако, необходимо иметь в виду, что все световозвращающие элементы, независимо от их конструкции, обладают и принципиальным недостатком, состоящим в том, что при углах освещения φ_0 , превышающих 50–60 градусов, при неизменном потоке Φ_0 резко увеличиваются потери световозвращения из-за уменьшения освещенности единичной поверхности катафота $\Phi(\varphi_0) = \Phi_0 \cos \varphi_0$, а также из-за возрастания потерь на отражения светового потока от образующей поверхности, поскольку лишь часть падающего потока $\Phi_0 \cos \varphi_0 k_{\text{trans}}$ пройдет внутрь катафота. Так, при угле освещения $\varphi_0 = 40^\circ$ эти потери составляют 28 %, а для $\varphi_0 = 60^\circ$ потери световозвращения возрастают до 55 %, т.е. почти в два раза. Это ограничение необходимо учитывать при проектировании катафотов любых типов.

Выводы

Рассмотрена работа асимметричного световозвращающего элемента при изменении угла освещения его пучком света в направлении вдоль широкой канавки. Исследована взаимосвязь между геометрическими и светотехническими характеристиками таких элементов.

Показано, что для любого угла освещения φ_0 асимметричного световозвращающего элемента с микропризмным рельефом можно определить оптимальное соотношение L/W между шагами расположения серий узких и широких канавок, при котором эффективная поверхность элемента максимальна. Для каждого из этих углов оптимизации φ_0^* можно установить зависимость коэффициента активной апертуры S/S^* от рабочего угла освещения φ_0 , что является основой проектирования световозвращающих элементов различного назначения. Определены минимальный L_{\min} и максимальный L_{\max} шаг рельефа, а также коэффициент экранирования поверхности k_1 при использовании для формирования рельефа резца с рабочим углом $\alpha = 36^\circ$, который является наиболее оптимальным с технологической точки зрения.

1. US Pat. 4,895,428, Int.cl. G02B 5/124. High Efficiency Retroreflective Material / J.C.Nelson, S.Cobb (USA); Jan.23, 1990.
2. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. — М.: Наука, 1973. — 720 с.
3. Ландсберг Г. Оптика. — М.: Наука, 1976. — 928 с.
4. Пат. 71672 України, МКИ 7 G02B5/12. Спосіб виготовлення світлоповертальних елементів / В.В.Петров, С.М.Шанойло, Л.В.Бугенко, А.А.Крючин, В.М.Зенін, В.Д.Ковтун, О.К.Войтенко (Україна); ІПРІ НАН України. — № 2002108488; Заявл. 25.10.2002; Опубл. 15.12.2004. — 2 с.

Поступила в редакцию 30.01.2007