

УДК 535.241.5

Е. Е. Антонов¹, С. М. Шанойло¹, А. В. Шиховец¹,
Минг Чжан², Кай Лю²

¹Институт проблем регистрации информации НАН Украины
ул. Н. Шпака, 2, 03113 Киев, Украина

²Чжецзянский технологический университет
Ханчжоу, Китайская народная республика

Оптические характеристики световозвращающих элементов

Проведен анализ оптических характеристик световозвращающих элементов при различных условиях освещения их рабочих поверхностей. Исследовано влияние процесса металлизации поверхности с микрорельефом на коэффициент световозвращения для симметричных и асимметричных световозвращающих элементов. Предложены методы контроля качества оптических поверхностей.

Ключевые слова: световозвращающий элемент, угол освещения, коэффициент отражения, металлизация поверхности, дифракционные явления.

Оптические характеристики микропризмных световозвращающих устройств, прежде всего, коэффициент световозвращения R , и коэффициент пропускания τ , зависят от многих параметров, однако основным является высокое качество рабочих поверхностей. Только в этом случае наиболее эффективно реализуется принцип полного внутреннего отражения [1], и потери падающего на поверхность потока света Φ_0 на рассеяние на границе раздела сред минимальны. Для контроля качества поверхностей элементов удобно использовать метод диагностики на основе анализа дифракционной картины, которая возникает при прохождении луча лазера через прозрачную микропризмную структуру. Предложенный метод можно реализовать на этапе тиражирования прозрачных копий штампа-матрицы до момента герметизации оптических рабочих поверхностей образцов.

Рассмотрим микрорельеф симметричного световозвращающего элемента, который имеет вид трех серий углублений с шагом W треугольного профиля с углом между гранями $\zeta = 70^\circ 31' 44''$, симметрично расположенных под углом 60° друг относительно друга.

© Е. Е. Антонов, С. М. Шанойло, А. В. Шиховец, Минг Чжан, Кай Лю

Сечение микрорельефа для такого единичного элемента в каждом из трех направлений резания на матрице-оригинале имеет вид прямоугольных треугольников ABC (рис. 1) с образующим углом $\alpha = 35^\circ 15' 52''$ и обратным углом $\beta = 54^\circ 44' 08''$. При освещении со стороны рельефа прозрачной копии, изготовленной с помощью штампа-матрицы, дифракционная картина формируется симметрично в каждом из трех направлений микрорельефа в виде двух полос, расположенных перпендикулярно направлению резания, т.е. всего наблюдается шесть интерференционных картин. Такой способ освещения поверхности световозвращателя при диагностике предпочтительнее варианта отражения светового потока от готового изделия, когда все три отражения от граней уголкового отражателя формируют одну общую интерференционную картину. Первый вариант позволяет отдельно анализировать качество поверхности каждой грани для всех трех направлений микрорельефа отражателя.

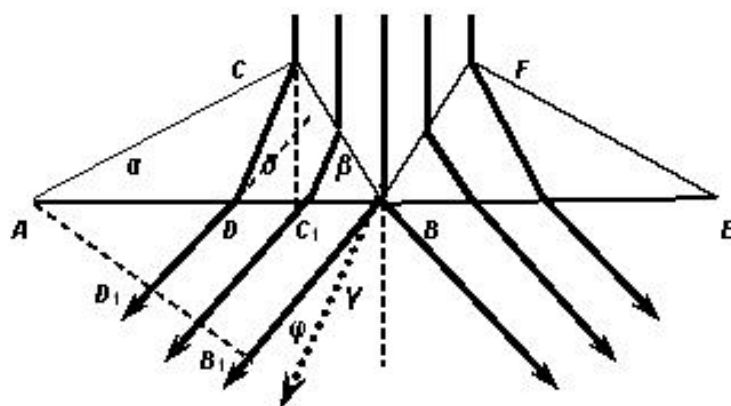


Рис. 1. Схема возникновения дифракционной картины при прохождении луча лазера через симметричный микропризмный элемент

Луч лазера, который падает на микрорельеф по нормали к образующей поверхности, проходит внутрь элемента для каждого из трех направлений рельефа в двух зонах треугольной формы CBF (рис. 1) и после двойного преломления на границе раздела сред разделяется на две группы интерферирующих пучков в виде системы темных и светлых полос, повернутых на угол γ относительно начального направления. Характерный размер системы полос AE равен шагу микрорельефа W , а ширина светлой полосы BD , которую в дальнейшем будем называть эффективной апертурой решетки S_0 , равна:

$$BD = W/2(\operatorname{tg}\alpha + \operatorname{tg}\delta)/((1 + \operatorname{tg}\alpha)^2). \quad (1)$$

Понятно, что в зависимости от угла наблюдения φ , который будем отсчитывать от направления распространения преломленного пучка γ , для каждого из рассматриваемых лучей возникает дополнительная разность хода, т.е. на экране в плоскости AB_1 будет наблюдаться интерференционная картина. Типичная интерференционная картина для одной из шести рабочих граней единичного элемента

симметричного световозвращателя ИПРИ НАН Украины (ИПРИ) приведена на рис. 2.

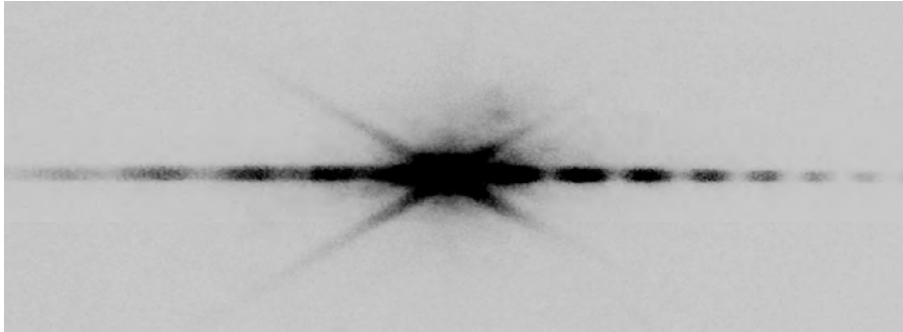


Рис. 2. Интерференционная картина для одной из граней симметричного световозвращательного элемента ИПРИ: $W = 600$ мкм, длина волны лазера $\lambda = 632,8$ нм

Предлагаемая методика диагностики базируется на сопоставлении реально наблюдаемой интерференционной картины с полученной теоретически, что дает возможность делать определенные выводы относительно качества поверхностей микропризм.

Примеры микрорельефа световозвращающих элементов ИПРИ приведены на рис. 3, где рис. 3а иллюстрирует рабочую матрицу симметричного световозвращающего элемента, изготовленную методом гальванопластики с матрицы-оригинала, полученной методом, так называемого, алмазного резания [2] с шагом нарезки $W = 150$ мкм, а рис. 3б относится к асимметричному элементу с шагом широкой канавки $W = 360$ мкм и шагом узкой канавки $L = 270$ мкм. При указанных параметрах угол оптимизации φ_0 [3] для этого асимметричного элемента составляет 65 градусов.

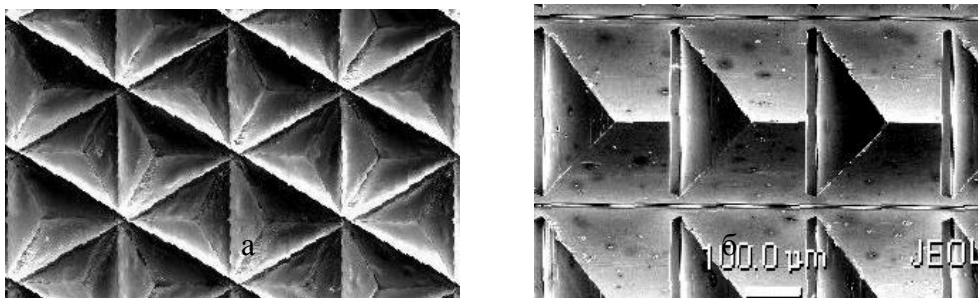


Рис. 3. Примеры микрорельефа световозвращающих элементов ИПРИ:
а) матрица симметричного элемента (шаг нарезки $W = 150$ мкм);
б) матрица асимметричного элемента ($W = 360$ мкм, $L = 270$ мкм)

Для практического рассмотрения явлений дифракции при прохождении пучка света через микрорельеф можно использовать упрощенную модель, когда световая волна считается плоской, реальные световые пучки треугольной формы заме-

няются прямоугольными, а разность хода лучей определяется чисто из геометрических соображений. Как и раньше будем считать, что поглощение потока в материале световозвращателя несущественно. Будем также считать, что разность хода интерферируемых лучей $\Delta = (BB_1 - CD)$ может быть учтена простым поворотом системы координат на угол γ , который легко определить из закона инвариантности излучения Снеллиуса [4]. В случае нахождения микропризмы в воздухе (показатель преломления $n_1 = 1,0$) для симметричного катафота, изготовленного из поликарбоната ($n_2 = 1,585$), этот угол $\gamma = 39^\circ 37' 45''$.

В новой системе координат направление распространения пучка света вдоль луча γ будет соответствовать углу наблюдения $\varphi = 0$. Тогда с учетом сделанных упрощений для описания интерференционных явлений можно использовать известные формулы для плоской дифракционной решетки [4]:

$$I = I_0 (\sin A \sin NB)(A \sin B)^{-1}, \quad (2)$$

где $A = (\pi S / \lambda) \sin\varphi$; $B = (\pi D / \lambda) \sin\varphi$; I_0 — амплитуда светового потока от одной щели дифракционной решетки в направлении $\varphi = 0$; λ — длина волны рассматриваемого излучения; D — период решетки; S — ширина одной щели; N — число щелей в решетке. Первый множитель A описывает дифракцию от одной щели, а другая составляющая B отвечает за интерференционные явления от N идентичных щелей.

В направлении γ (рис. 1) эффективный период решетки $D_1 = W \cos\gamma$, а эффективная апертура призмы S_1 , которая является аналогом величины S в формуле (2), равна:

$$S_1 = S_0 \cos\gamma = W/2 (\operatorname{tg}\alpha + \operatorname{tg}\delta)/(1 + \operatorname{tg}\alpha^2) \cos\gamma. \quad (3)$$

При использовании для диагностики гелий-неонового лазера с длиной волны $\lambda = 632,8$ нм, множители A и B в формуле (2) имеют такой вид:

$$A = (\pi W/2 (\operatorname{tg}\alpha + \operatorname{tg}\delta)/(1 + \operatorname{tg}\alpha^2) \cos\gamma / (0,6328) \sin\varphi),$$

$$B = (\pi W \cos\gamma / 0,6328) \sin\varphi. \quad (4)$$

Величина N в нашем случае имеет смысл размера площадки микрорельефа, которая освещается лучом лазера, и ее величина зависит от диаметра D_λ луча лазера, используемого для диагностики. Как правило, диаметр D_λ составлял 3,5 мм, поэтому в расчетах величина N варьировалась в диапазоне 2–8 в зависимости от шага рельефа W .

Полученные расчетные интерференционные картины, которые возникают на экране после прохождения луча лазера через микропризменный рельеф, для некоторых значений W приведены на рис. 4. Для удобства все углы дифракции пересчитаны непосредственно в расстояния в миллиметрах от положения «нулевого» максимума для случая, когда расстояние до экрана составляет 1,0 м. Интенсивности на всех графиках приведены в относительных единицах.

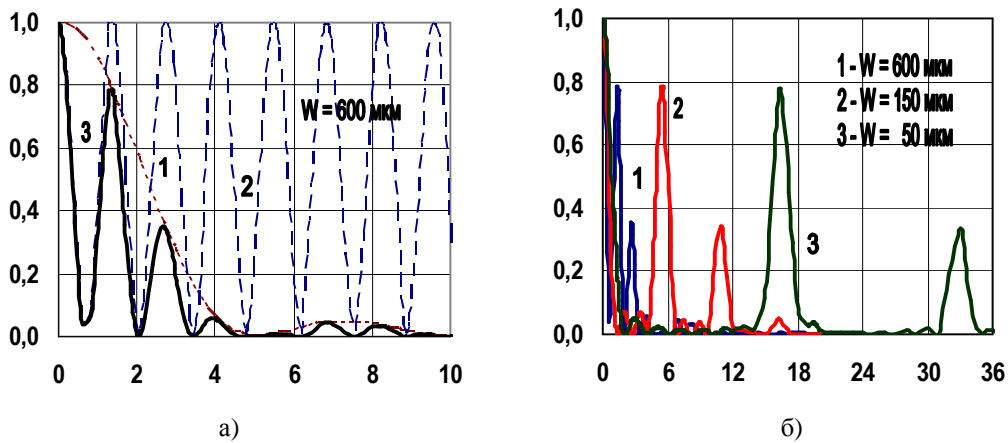


Рис. 4. Дифракционные эффекты для симметричного световозвращающего элемента: а) шаг нарезки $W = 600$ мкм, число щелей $N = 4$: 1 — дифракционная картина от одной щели; 2 — интерференция для N щелей; 3 — интегральная картина; б) интегральная интерференционная картина для случая $N = 8$: 1 — шаг нарезки $W = 600$ мкм; 2 — $W = 150$ мкм; 3 — $W = 50$ мкм

Главной особенностью полученных расчетных данных является то, что в случае дифракции света на симметричном световозвращающем элементе в интегральной интерференционной картине практически присутствует лишь несколько первых основных максимумов, поскольку для такого микрорельефа $D_1 \approx 3,7 S_1$.

Экспериментальные данные по реальному распределению интенсивности на экране были получены в параллельном пучке излучения лазера (дифракция Фраунгофера), расстояния от центрального максимума соответствовали размещению экрана на расстоянии 1,0 м от исследуемого микропризмного рельефа, ширина сканирующей щели составляла 140 мкм. Полученная типичная дифракционная картина распределения интенсивности на экране приведена на рис. 5–7 для некоторых граней микрорельефа симметричного световозвращателя с шагом W , равным 150 и 600 мкм.

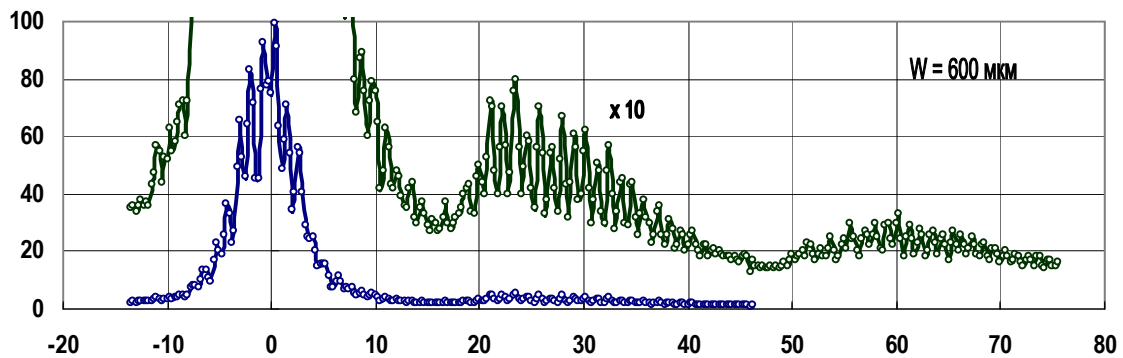


Рис. 5. Экспериментальные данные для симметричного световозвращающего элемента. Шаг микрорельефа $W = 600$ мкм, грань № 1

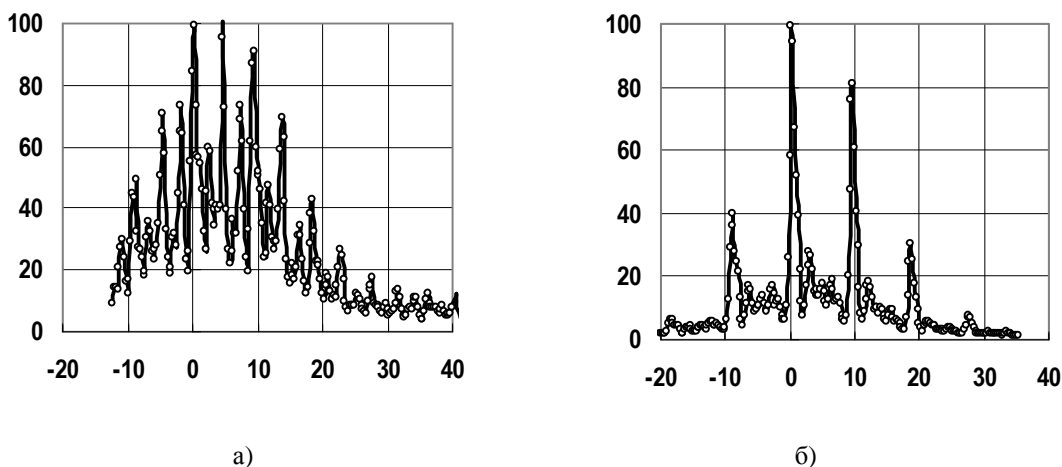


Рис. 6. Экспериментальные данные для симметричного световозвращающего элемента. Шаг нарезки $W = 150$ мкм: а) грань № 1; б) грань № 2

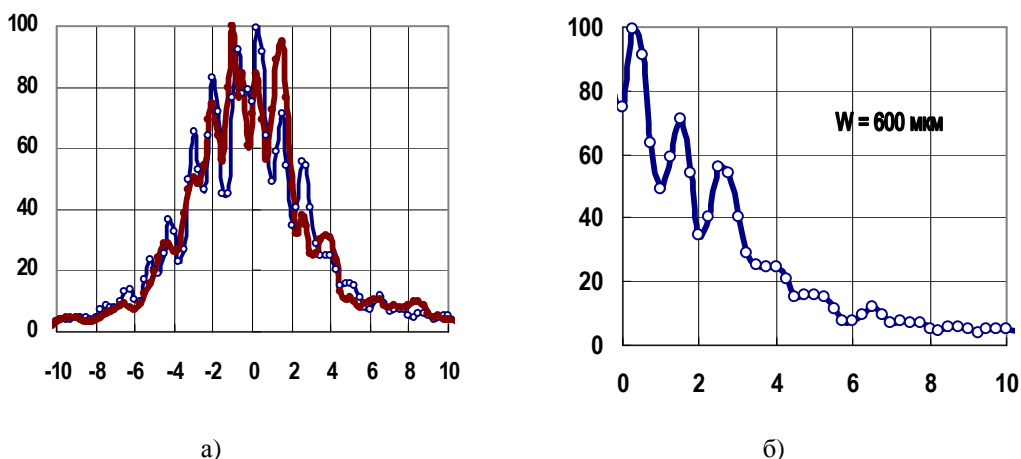


Рис. 7. Экспериментальные данные для симметричного световозвращающего элемента. Шаг нарезки $W = 600$ мкм: а) грани № 1 + № 2; б) грань № 2

Из рис. 6 видно, что для элемента с шагом нарезки $W = 150$ мкм картина для одной грани выбранного направления микрорельефа (рис. 6а) существенно отличается от картины для другой грани (рис. 6б) и совершенно не соответствует расчетным характеристикам (рис. 4б). Наблюдается также множество, так называемых, духов Роуланда [4], что свидетельствует о неидеальности оптических поверхностей микропризм с шагом $W = 150$ мкм.

В то же время, для микрорельефа с шагом нарезки $W = 600$ мкм практически совпадают экспериментальные точки для двух граней одного направления рельефа (рис. 7а). Наблюдается также совпадение теории (рис. 4а, кривая 3) и эксперимента (рис. 7б) для одной грани этого микрорельефа, что говорит о хорошем качестве рассматриваемых световозвращателей.

Таким образом, сравнение экспериментально полученного распределения интенсивности лазерного луча после его прохождения через микрорельеф с расчетными данными дает возможность оценить качество рабочих поверхностей.

Конечно, какие-либо интерференционные эффекты можно исследовать только с помощью источника когерентного монохроматического излучения, например, лазера в одномодовом режиме, который является достаточно доступным и эффективным инструментом диагностики.

Другим важным фактором повышения коэффициента световозвращения R является оптимизация геометрических характеристик микрорельефа. Ранее [3] были детально исследованы асимметричные световозвращающие элементы с целью оптимизации геометрических параметров микрорельефа при создании на образующей поверхности групп уголкового отражателей. Оптимизированные таким образом микропризмные структуры обладают максимальной эффективной рабочей зоной S^* для выбранного угла освещения φ_0 . Будем в дальнейшем называть величину φ_0 углом наклона плоскости элемента в вертикальном направлении, а случай освещения элемента вдоль прямоугольной канавки будет соответствовать нулевому углу β наклона световозвращающего элемента в горизонтальном направлении.

Световозвращение в первом случае обеспечивается за счет принципа полного внутреннего отражения, поскольку углы φ_0 падения потока света на внутреннюю поверхность микрорельефа при повороте элемента в вертикальном направлении всегда оказываются меньше предельного.

Однако уже небольшие отклонения угла β от оптимального по горизонтали приводят к превышению предельного значения угла, что снижает коэффициент световозвращения R асимметричного световозвращателя. Этот случай всегда реализуется, например, при освещении фарами автомобиля катафота с асимметричными световозвращающими элементами, установленного на полотне дороги, при приближении автомобиля к катафоту.

Простым решением этой проблемы может быть напыление слоя металла на поверхность микрорельефа. В этом случае происходит отражение потока излучения Φ_0 от внутренней поверхности зеркального металлического слоя. Соответствующий коэффициент отражения $k(\varphi_0)$ может быть рассчитан по формулам, аналогичным формулам Френеля [4], но с учетом поглощения пучка света в поверхностном слое металла h путем введения комплексного показателя преломления $n' = n(1 - i\chi)$, при этом мнимая часть показателя ($n\chi$) определяет процесс поглощения световой волны слоем металла:

$$\Phi_h = \Phi_0 \exp(-kh) = \Phi_0 \exp(-4\pi/\lambda) \chi h. \quad (5)$$

Для пучков света, поляризованных в плоскости падения (\updownarrow), и в плоскости, перпендикулярной плоскости падения (\leftrightarrow), коэффициенты отражения пучков определяются [4] соответственно:

$$k(\varphi_0)_{(\updownarrow)} = (n - \cos \varphi_0)^2 + \chi^2 / (n + \cos \varphi_0)^2 + \chi^2, \quad (6)$$

$$k(\varphi_0)_{(\leftrightarrow)} = (n - 1/\cos \varphi_0)^2 + \chi^2 / (n + 1/\cos \varphi_0)^2 + \chi^2). \quad (7)$$

В случае нормального падения лучей ($\varphi_0 = 0$) суммарный коэффициент отражения:

$$k(\varphi_0 = 0) = [(n - 1)^2 + \chi^2] / [(n + 1)^2 + \chi^2]. \quad (8)$$

В выражениях (5)–(8) λ — длина волны падающего на поверхность металла пучка света, см; h — толщина поглощающего слоя, см; k — коэффициент поглощения металла, 1/см; безразмерный коэффициент $\chi = k\lambda / 4\pi$; n — показатель преломления металла.

Отметим, что толщина напыляемого слоя должна быть небольшой. Действительно, лишь очень тонкие слои металла (порядка длины волны падающего света) участвуют в процессе формирования вторичной отраженной волны, которая вызвана колебаниями свободных электронов в поверхностном слое металла при отражении световой волны. Более глубокие слои металла участвует лишь в процессе поглощения света согласно (5). Минимальное значение толщины слоя h определяется требованием непрозрачности слоя металла при визуальном наблюдении. В видимом диапазоне это соответствует толщинам $h = 0,1$ – $0,2$ мкм. Максимальное же значение h определяется лишь экономическими соображениями. Понятно, что слой металла должен быть достаточно толстым, чтобы обеспечить необходимую гидроизоляцию и механическую стойкость покрытий. При разработке дорожных катафотов с металлизированными световозвращающими элементами, по-видимому, оптимальными являются слои металла толщиной $0,2$ – $0,4$ мкм.

В наших экспериментах использовалось напыление слоя серебра. На рис. 8 приведена зависимость коэффициента световозвращения R асимметричного световозвращающего элемента ИПРИ от угла β поворота его поверхности в горизонтальной плоскости при трех фиксированных значениях угла φ_0 наклона поверхности в вертикальном направлении для металлизированных и не металлизированных поверхностей.

Видно, что металлизация поверхности с микрорельефом приводит к существенному расширению углового распределения световозвращения. Так, например, для угла $\varphi_0 = 45^\circ$ без металлизации микрорельефа при увеличении угла β до 30° коэффициент R снижается более чем в 10 раз (кривая 1, пунктир), в то время, как металлизированная поверхность обнаруживает снижение световозвращения всего на 40 % (сплошная линия). Чем больше начальный наклон φ_0 образующей поверхности в вертикальной плоскости, тем заметнее эффект металлизации при повороте по горизонтали. Это объясняется тем, что при большей величине φ_0 превышение значения предельного угла наступает быстрее, т.е. при меньших углах β (кривые 1 и 3 на рис. 2).

Для симметричных световозвращающих элементов исследование эффекта металлизации рельефа дает аналогичные результаты. Максимальный коэффициент активной апертуры k_a для таких симметричных световозвращателей составляет около 0,67, и эффективность световозвращения максимальна, когда пучок света

падает на рабочие грани микрокубов под оптимальным углом $35^{\circ}15'52''$ между каждой из граней и нормалью к образующей поверхности. Это направление называется осью симметричного световозвращающего элемента.

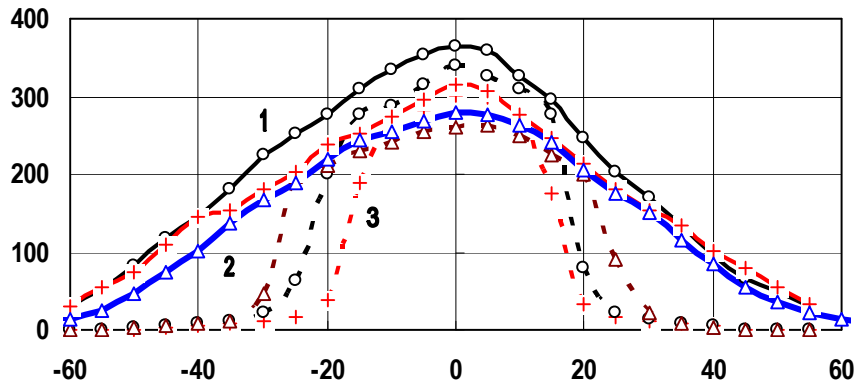


Рис. 8. Зависимость коэффициента R (кд/лк m^2) для асимметричного световозвращающего элемента ИПРИ от угла освещения β (градусы) в случае металлизации поверхности серебром (сплошные линии) и без металлизации микрорельефа (пунктир): 1 — угол наклона поверхности в вертикальном направлении $\varphi_0 = 45^{\circ}$; 2 — угол $\varphi_0 = 60^{\circ}$; 3 — угол $\varphi_0 = 30^{\circ}$

При освещении симметричного элемента, в направлении, отличающемся от указанной оси, эффективность световозвращения снижается. Одна из типичных подобных зависимостей приведена на рис. 9 (кривая 1). Эффект объясняется тем, что помимо уменьшения коэффициента активной апертуры элемента k_a уменьшаются также величины углов освещения микрорельефа, которые в конце концов становятся меньше значения предельного угла. Так, для рассмотренной выше системы «поликарбонат–воздух» уже при углах освещения симметричного световозвращающего элемента $\varphi_0 > 4^{\circ}$ световой поток вместо полного внутреннего отражения начинает проходить внутрь элемента, а при углах $\varphi_0 = 10\text{--}15^{\circ}$ такие потери светового потока Φ_0 становятся весьма значительными.

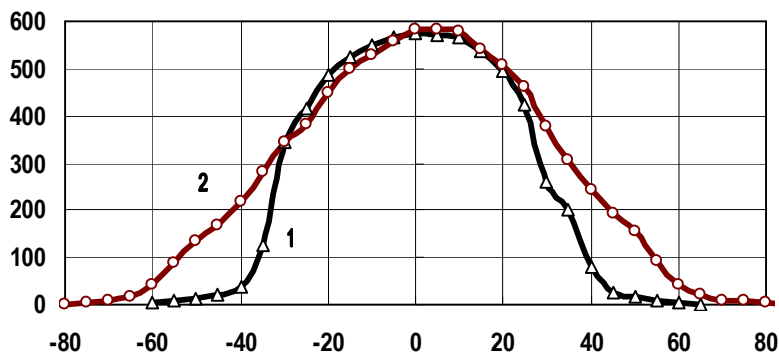


Рис. 9. Зависимость коэффициента световозвращения R (кд/лк m^2) для симметричного световозвращающего элемента ИПРИ от угла φ_0 (градусы): 1 — без металлизации поверхности с микрорельефом; 2 — поверхность металлизирована серебром

Металлизация рабочих поверхностей приводит к заметному увеличению коэффициента световозвращения при углах освещения $\varphi_0 > 30\text{--}35^\circ$ (см. рис. 9, кривая 2). Это связано с тем, что для металлизированной поверхности при любых углах освещения световой поток не проходит внутрь металла, а отражается от границы раздела сред «поликарбонат–серебро». Рассматриваемый эффект наблюдается при наклоне симметричного элемента относительно его оси в любом из направлений, поскольку рельеф в таких элементах за счет усреднения по всем индивидуальным микротетраэдрам структуры симметричен относительно нормали к образующей поверхности. Например, для углов освещения $\varphi_0 > 40^\circ$ коэффициент световозвращения R увеличивается почти в 10 раз. Это позволяет рекомендовать применение предварительной металлизации рабочих поверхностей с микрорельефом перед герметизацией световозвращательных элементов с целью получения максимального светоотражения при больших углах освещения.

Авторы выражают благодарность к.т.н. И.А. Косско за предоставленные фотографии микрорельефа световозвращающих элементов, которые были получены с помощью электронного микроскопа «JEOL».

Выводы

Исследованы оптические характеристики микропризмных световозвращающих элементов при изменении углов освещения его пучком света в горизонтальной и вертикальной плоскостях.

Предложена методика диагностики качества поверхностей световозвращателей, основанная на анализе дифракционной картины, возникающей при прохождении луча лазера через периодическую микропризмную структуру.

Установлено, что металлизация поверхности с микрорельефом для всех типов световозвращающих элементов приводит к существенному расширению угловой зависимости характеристики световозвращения. Это позволяет рекомендовать применение предварительной металлизации рабочих поверхностей перед герметизацией элементов при разработке дорожных катафотов и световозвращателей различного назначения с максимальным светоотражением при больших углах освещения.

1. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. — М.: Наука, 1973. — 720 с.

2. Патент 74034 України, G02B5/124, B32B3/00. Спосіб виготовлення призмодібних світлоповертальних елементів / В.В.Петров, С.М.Шанойло, О.І.Гранат, Л.В.Бутенко, А.А.Крючин, В.М.Зенін, В.Д.Ковтун, О.К.Войтенко, В.О.Заболотний, П.В.Майстренко, А.В.Ковальчук (Україна); ІПРІ НАН України. — № 2003076449; заявл. 10.07.2003; опубл. 17.10.2005. — 2 с.

3. Петров В.В., Шанойло С.М., Крючин А.А., Антонов Е.Е., Кравец В.Г. Моделирование свойств асимметричных световозвращающих элементов // Реєстрація, зберігання і оброб. даних. — 2007. — Т. 9, № 2. — С. 17–25.

4. Ландсберг Г.С. Оптика. — М.: Наука, 1976. — 928 с.

Поступила в редакцию 27.05.2008