

УДК 535.241.5

**В. В. Петров, В. Г. Кравец, А. А. Крючин,
С. М. Шанойло, О. И. Гранат, В. Н. Зенин**
Институт проблем регистрации информации НАН Украины
ул. Н. Шпака, 2, 03113 Киев, Украина

Анализ информации отраженного от ретрозеркал света

Проведен анализ энергетических и фотометрических характеристик света, отраженного от ретрозеркал. Сделан выбор люксметра для анализа отраженного света, который обладает спектральной чувствительностью, характерной для человеческого глаза, и линейностью отклика. Проведены измерения световых характеристик изготовленных ретрозеркал, а также сравнение с зарубежными аналогами.

Ключевые слова: ретрозеркало, люксметр, кандела, спектральная чувствительность.

Оптические основы работы ретрозеркала

Обычное плоское зеркало поворачивает направление z -компоненты волнового вектора k падающей плоской волны $\exp(ikR)$ в обратном направлении, а именно: $(k_x, k_y, k_z) \rightarrow (k_x, k_y, -k_z)$. Здесь для удобства выбрано распространение света вдоль оси z , которая нормальна к плоскости зеркала. В первом приближении пренебрежем эффектами дифракции, тогда, согласно принципу зеркального изображения, можно получить выражение для поля общего вида [1, 2]:

$$E_{ret}(x, y, z) = \rho E_{inc}(x, y, -z + 2z_0), \quad (1)$$

где z_0 — координата зеркала; ρ — амплитудный коэффициент отражения; E_{ret} , E_{inc} — амплитуды световых волн отражения и падения.

Теперь усложним задачу. Возьмем два зеркала, составляющие двугранный угол в 90° (выберем зеркала $z = z_0$ и $y = y_0$), тогда отражение парой таких зеркал преобразует поле по закону:

$$E_{ret}(x, y, z) = \rho^2 E_{inc}(x, -y + 2y_0, -z + 2z_0). \quad (2)$$

Для плоской волны такое отражение эквивалентно преобразованию $(k_x, k_y, k_z) \rightarrow (k_x, -k_y, -k_z)$.

© В. В. Петров, В. Г. Кравец, А. А. Крючин, С. М. Шанойло, О. И. Гранат, В. Н. Зенин

Наконец, добавим третье зеркало под прямым углом к первым двум так, чтобы образовать угол куба. В этом случае падающий луч испытает отражение от всех трех зеркал: $(k_x, k_y, k_z) \rightarrow (-k_x, -k_y, -k_z)$. Закон преобразования светового поля в этом 3-х мерном уголкового отражателе примет вид инверсии:

$$E_{ret}(x, y, z) = \rho^3 E_{inc}(-x + 2x_0, -y + 2y_0, -z + 2z_0). \quad (3)$$

Два замечательных свойства такого отражателя: а) он обращает направление распространения любой плоской волны $(k_x, k_y, k_z) \rightarrow (-k_x, -k_y, -k_z)$; б) свойство ретроотражения не зависит от ориентации самого отражателя, поскольку в выражение (3) входит только координата вершины угла (x_0, y_0, z_0) .

Если световое падающее поле имеет вид двух плоских волн

$$E_{inc}(\vec{R}) = c_1 \exp(i\vec{k}_1 \vec{R}) + c_2 \exp(i\vec{k}_2 \vec{R}), \quad (4)$$

тогда уголкового отражатель трансформирует это поле в вид:

$$E_{ret}(\vec{R}) = \rho^3 [c_1 \exp(i2\vec{k}_1 \vec{R}_0) \exp(-i\vec{k}_1 \vec{R}) + c_2 \exp(i2\vec{k}_2 \vec{R}_0) \exp(-i\vec{k}_2 \vec{R})], \quad (5)$$

где c_1 и c_2 — амплитуды падающих световых волн. Мы описали отраженное здесь поле на примере двух волн. Это описание можно распространить на множество волн, считая, что мы имеем дело с протяженным источником излучения. Можно видеть, что линейная (без комплексного сопряжения) операция в выражении (5) обращает лишь направление распространения света, не меняя при этом знак относительной разности фаз (сравни выражения (5) и (4)). На языке лучевой оптики сохранению фазовых соотношений соответствует сдвиг индивидуального луча на величину $2a$ (где a — прицельный параметр луча относительно вершины уголкового отражателя, расстояние между вершиной и точкой отражения на первой отражающей плоскости ретроотражателя).

Обычно мы имеем дело не с плоской волной, а со сферической, выходящей из источника освещения ретроотражателя. Пусть сферическая волна, расходящаяся от источника с координатой R_1 , преобразуется 3-х мерным уголкового отражателем не в сходящуюся к R_1 волну, а в расходящуюся от нового источника с координатами $R_2 = 2R_0 - R_1$. Таким образом, в пределах апертуры такого уголкового отражателя происходит обращение центрального направления, но не кривизны пучка сферической волны. Допустим, что размеры кубического уголкового отражателя заданы и равны длине стороны D . Обозначим радиус кривизны волнового фронта падающей сферической волны через S_0 , при этом выполняется условие: $S_0 \gg D$. В этом случае прогиб волнового фронта по сравнению с плоскостью, нормальной к центральному направлению распространения, составляет $\delta h \sim D^2/S_0$ [1, 2]. Отсюда следует, что больше света будет отражаться по направлению к источнику излучения, если размеры уголкового отражателя будут минимальными. В связи с этим в американских патентах [3–5] отмечается, что существующие уголкового отражатели имеют размер боковой кромки порядка 0,025 дюйма, но

более предпочтительно уменьшить этот размер до 0,004–0,008 дюйма. Главным назначением угловых отражателей является трансформация энергии в направлении источника света. Если $\delta h \ll \lambda$ (λ — длина волны падающего света, для видимого спектра $\lambda = 555$ нм), то такой ретроотражатель будет осуществлять операцию обращения волнового фронта и отраженная энергия будет максимальной.

Для эффективного отражения падающего излучения используется набор отражателей с малыми размерами. При этом в пределах каждого отражателя происходит обращение своего центрального направления (т.е. обращение среднего наклона волнового фронта). Максимальный сдвиг волнового фронта — центрально-го луча — ограничивается размерами одного 3-х мерного углового отражателя.

Имеется предел измельчения индивидуальных отражающих элементов. Если допустить, что в пределах каждого элемента происходит максимальное отражение в направлении падающего пучка, то при этом будут иметь место относительные сдвиги в фазе между этими лучами; это различие пропорционально относительному расстоянию между отражателями. Кроме этого волновой отраженный фронт будет иметь скачки в промежутках между отражательными индивидуальными элементами. Из-за этих скачков излучение, отраженное от ретроотражателя, будет испытывать дополнительную расходимость $\delta \theta \sim \lambda/D$, соответствующую дифракции на апертуре одного углового отражателя [2, 6]. Это будет способствовать расходимости луча, падающего на приемник, совмещенный с источником света, что приведет к неопределенности поперечной координаты луча: $\delta x \sim L\lambda/D$, где L — расстояние от отражателя до источника.

Расходимость отраженного луча будет также вызываться неточностью угла отражателя (так называемое отклонение от 90°). Допустим, что мы имеем некоторое нерегулярное отклонение угла от $90^\circ \pm \Delta\theta(x)$ в зависимости от поперечной координаты x . В приближении геометрической оптики индивидуальный отражательный элемент обращает направление попавшего на него луча с поперечным сдвигом $\theta_{ret}(x) \approx -\theta_{inc}(x + a)$, где $a < D$. В результате, при обратном проходе луча через отражатель возникает угловая неточность $\delta\theta_1 \approx \Delta\theta/\Delta x$. Из-за этого также возникнет угловое расхождение отраженного от ретрозеркала излучения $\delta\theta_3 \approx L\lambda/D * \Delta\theta/\Delta x$. При этом $\Delta\theta/\Delta x \sim \theta_{er}/b$, где b — поперечный масштаб неоднородности функции $\theta_{ret}(x)$, что равнозначно ширине полного ретрозеркала; θ_{er} — ошибка в угле изготовления угловых отражателей (средняя величина). Оценки показывают, что эффективное ретроотражение будет только лишь при условии $\lambda/\theta_{er} \ll b$. Оптимальный выигрыш в светоотражении достигается при $D \sim 0,1(b\lambda/\theta_{er})^{1/2}$. Коэффициент 0,1 появляется из факта, что расходимость из-за неточности изготовления угловых отражателей больше по сравнению с дифракционной расходимостью (не менее чем в 10 раз). Сделаем численные оценки: положим, что $\theta_{er} \sim 10$ мин = $2 \cdot 10^{-3}$ рад, $b \sim 10$ см, $\lambda \sim 5,55 \cdot 10^{-5}$ см (зеленая область спектра). В этом случае ретроотражатель должен состоять из граней с размерами $D \sim 0,05$ см $\sim 0,02$ дюйма, что согласуется с требованиями, предъявляемыми в патентах US [3–5]. Но в случае больших разбросов в углах отклонения от 90° , более чем 10 мин, требования к размерам граней светоотражающих элементов возрастают.

Измерение светоотражения

При испытании полученных светоотражательных элементов необходимо измерять их способность возвращать свет в направлении, из которого он вышел. Так как ретроотражатели дают возможность вернуть назад световую волну, согласующуюся с падающей интенсивностью, то их характеристикой должны служить энергетические величины: плотность потока энергии ретроотражения, мощность отраженной энергии и др. Их можно измерить с помощью физических приборов. Однако в связи с тем, что ретроотражатели, в первую очередь, должны помогать автомобилистам ориентироваться на автобанах, то приемником отраженного света становится глаз, который реагирует на энергетические характеристики света в видимом диапазоне. Однако ощущения, вызываемые светом в человеческих глазах, определяются не только энергетическими характеристиками, но также и другими обстоятельствами, в первую очередь длиной волны света. Максимальной чувствительностью глаз обладает к зеленому свету с длиной волны 555 нм [7–9]. Спектральная чувствительность среднестатистического человеческого глаза приведена на рис. 1. Поэтому во многих случаях интерес представляют не сами энергетические характеристики света, а те субъективные ощущения, которые с ними связаны. Для предоставления информации о свойствах отраженного света, которая анализируется человеческими глазами, пользуются иными, отличными от энергетических, величинами, называемыми фотометрическими. Энергетические и фотометрические величины взаимосвязаны, и мы покажем, как, измеряя одни из них, можно перейти к другим. Такое сравнение позволит нам определить свето-возвращение в абсолютных единицах.

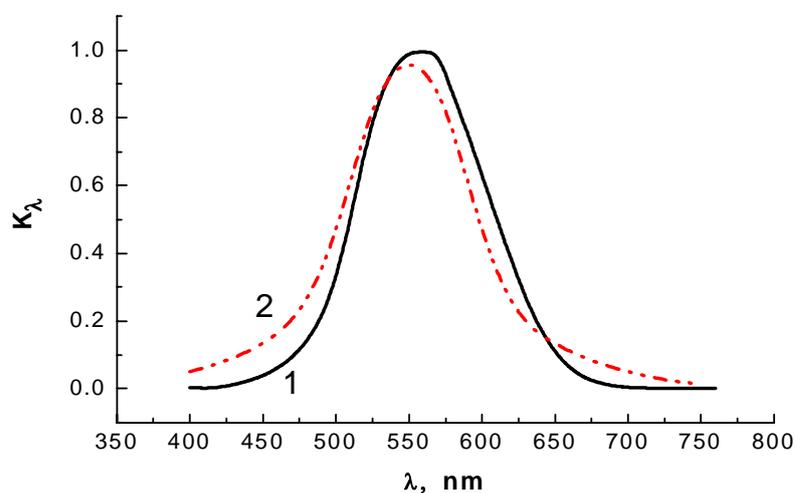


Рис. 1. Спектральная чувствительность глаза (1) и люксметра (2)

Сравнение энергетических и фотометрических величин

Мощность излучения равна произведению энергетической силы излучения и элемента телесного угла, в который она испускается (спектральная плотность

мощности P_λ излучения — это мощность, приходящаяся на интервал длин волн $(\lambda, \lambda + \Delta\lambda)$ [8]:

$$\begin{aligned} dP &= dI d\Omega, \\ dP_\lambda &= dI_\lambda d\Omega. \end{aligned} \quad (6)$$

Мощность измеряется в ваттах.

Основной фотометрической величиной есть сила света, которая измеряется в канделах (кд). Одна кд — это сила света, излучаемого перпендикулярно поверхности черного излучателя с площади $1/6 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$ при температуре затвердевания платины, находящейся под давлением 101325 Па.

Энергетической мощности dP соответствует световой поток $d\Phi_v$, равный произведению силы света dI_v на телесный угол $d\Omega$, в котором испущен свет:

$$\begin{aligned} d\Phi_v &= dI_v d\Omega, \\ d\Phi_{v\lambda} &= dI_{v\lambda} d\Omega. \end{aligned} \quad (7)$$

Световой поток измеряется в люменах (лм). $1 \text{ лм} = 1 \text{ кд} \cdot 1 \text{ ср}$. Если точечный источник с силой света I_{v0} излучает во всех направлениях, то полный поток его излучения равен: $\Phi_{v0} = 4\pi I_{v0}$ (лм).

Если излучение падает на поверхность светоотражателя, тогда величиной, характеризующей это действие, служит энергетическая освещенность E . Она равна отношению мощности излучения dP , падающего на элемент поверхности, к площади элемента $d\sigma$:

$$\begin{aligned} E &= dP / d\sigma, \\ E_\lambda &= dP_\lambda / d\sigma, \end{aligned} \quad (8)$$

где dP_λ — спектральная плотность энергетической освещенности E_λ . Энергетическая освещенность измеряется в Вт/м².

В фотометрии освещенность и спектральная плотность освещенности определяются через отношения падающего светового потока к площади поверхности:

$$\begin{aligned} E_v &= \frac{d\Phi_v}{d\sigma}, \\ E_{v\lambda} &= \frac{d\Phi_{v\lambda}}{d\sigma}. \end{aligned} \quad (9)$$

Освещенность измеряется в люксах (лк): $1 \text{ лк} = 1 \text{ лм/м}^2$.

Для установления взаимосвязи между энергетическими и фотометрическими величинами сначала остановимся на соотношении между спектральной плотностью светового потока $\Phi_{v\lambda}$ и спектральной мощностью P_λ . Количественно это соотношение характеризуется величиной:

$$V(\lambda) = \frac{\Phi_{V\lambda}}{P_\lambda}, \quad (10)$$

называемой спектральной световой эффективностью, которая существенно зависит от длины волны. Экспериментально было установлено, что функция $V(\lambda)$ достигает максимального значения при длине волны 555 нм. Вместо $V(\lambda)$ обычно пользуются безразмерной величиной — относительной спектральной световой эффективностью:

$$K(\lambda) = V(\lambda) / V(555 \text{ нм}). \quad (11)$$

Кривая функции $K(\lambda)$ представлена на рис. 1.

Спектральная плотность светового потока определяется выражением:

$$\Phi_{V\lambda} = V(555 \text{ нм}) K(\lambda) P_\lambda. \quad (12)$$

Тогда световой поток будет представлен в виде:

$$\begin{aligned} \Phi_V &= \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_{V\lambda} d\lambda = V(555 \text{ нм}) \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} K(\lambda) P_\lambda d\lambda, \\ dI_V &= V(555 \text{ нм}) \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} K(\lambda) dI_\lambda d\lambda. \end{aligned} \quad (13)$$

Эти формулы связывают значения энергетических и фотометрических величин.

Применяя эти выражения для эталонного источника света, который представляет собой абсолютно черное тело с температурой 2045 К, можно установить количественное соотношение между фотометрическими и энергетическими величинами:

$$lx = \frac{kd}{m^2} = 2\pi \cdot 6 \cdot 10^5 \frac{lm}{m^2 sr} = 2\pi \cdot 6 \cdot 10^5 \cdot 1,46 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{Wt}{m^2 sr^2}. \quad (14)$$

В общем виде, связь между освещенностью площадки $d\sigma$ в люксах и параметрами источника излучения, выраженными в ваттах, может быть записана [7, 8]:

$$\frac{dI_V}{d\sigma} = V(555 \text{ нм}) \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} K(\lambda) \frac{c}{8\pi} w_\lambda d\lambda, \quad (15)$$

где $V(555 \text{ нм}) = 683 \text{ лм/Вт}$, а w_λ — спектральная плотность излучения используемого источника. Для функции w_λ используют эталон излучения в виде абсолютно черного тела с цветовой температурой T :

$$w_\lambda = \frac{16\pi^2 c^2 \hbar}{\lambda^5} \frac{1}{\exp[2\pi\hbar c / (kT\lambda)] - 1}. \quad (16)$$

В нашем эксперименте используется источник света с цветовой температурой $T \approx 3000 \text{ К}$. Так как функция $K(\lambda)$ известна (рис. 1), тогда проведя интегрирование выражения (15) найдем соответствие между энергетическими и фотометрическими величинами. Из рис. 1 следует, что спектральная чувствительность человеческого глаза и люксметра, используемого для измерений, очень похожи.

Возникает еще вопрос о возможности применения люксметра в измерениях — это его линейность по отношению к мощности падающего излучения. Для проверки линейности характеристик люксметра были проведены измерения светотражения с помощью Luxmeter ETI-1301 и аттестованного измерителя мощности. Было установлено, что используемый нами люксметр имеет достаточно линейную характеристическую кривую отклика от интенсивности падающего излучения (рис. 2). Здесь мы использовали измерение световозвращения от угла поворота световозвращателя. Сравнение кривых измерения светотражения с помощью люксметра и измерителя мощности (рис. 2) свидетельствует о линейности отклика люксметра. Таким образом, использование люксметра для измерения светотражения от ретрозеркал предопределяется как его близкой к человеческому глазу чувствительностью к спектральному составу анализируемого излучения (рис. 1), так и линейностью отклика в зависимости от интенсивности отраженного сигнала (рис. 2).

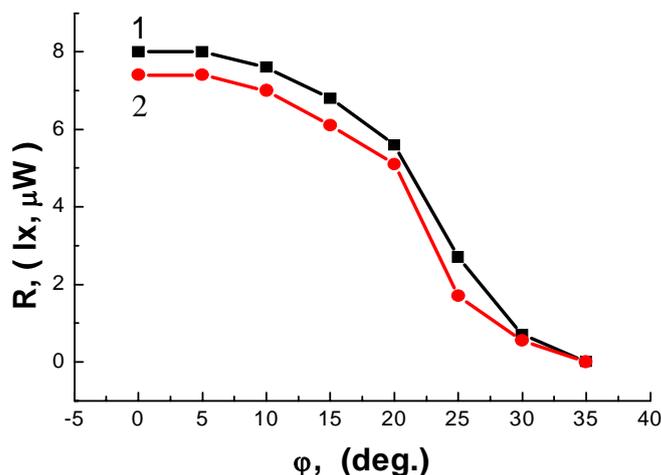


Рис. 2. Сравнения линейности отклика характеристик люксметра (1) и измерителя мощности (2)

Для определения параметров световозвращения в измерительных установках используют источники света типа А или D [10]. Источник типа А должен обладать цветовой температурой $T \approx 2856 \text{ К}$, которая согласно закону смещения Вина

будет обеспечивать максимум излучения при $\lambda_{\max} = 0,0029/T$ (нм), что равно приблизительно 1200 нм при заданной температуре [7, 8]. Таким образом, в видимом диапазоне спектра такой источник обеспечит линейное возрастание спектральной плотности излучения.

На рис. 3 приведены данные измерений световозвращения от ретрозеркал, изготовленных в ИПРИ НАН Украины, и их зарубежных аналогов. Полученные зависимости показывают, что максимальное значение световозвращения стремится до $200 \text{ кд}/(\text{лк}\cdot\text{м}^2)$. Световозвращение существует до углов наклона плоскости ретрозеркала по отношению к нормали порядка 30° . И уменьшение величины световозвращения до половинного ее значения в максимуме происходит на углах $\sim \pm 20^\circ$. Различие между угловыми зависимостями ретроотражения для отечественных и зарубежных аналогов состоит в форме кривых. Для наших ретрозеркал кривая является частично асимметричной, а зарубежный отражатель демонстрирует достаточно симметричную зависимость.

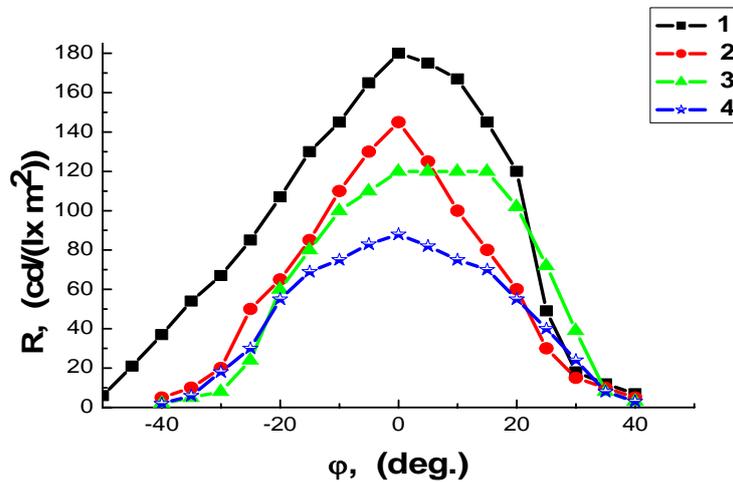


Рис. 3. Сравнение угловых зависимостей световозвращения от призмных рассеивателей: (1) — изготовленный в ИПРИ; (2) — изготовленный компанией Shayger (Германия); (3) — изготовленный в ИПРИ с защитной белой пленкой; (4) — изготовленный в ИПРИ с защитной серой пленкой

Проанализируем, от чего зависит распространение световозвращения от центральных направлений между источником и приемником к периферийным областям. Такая зависимость, по-видимому, определяется неточностями изготовления элементов 3-х мерных уголкового отражателей. В первую очередь, это связано с неточностью углов при вершинах отражающих элементов ($90 - \theta_{er}$) град. Допустим, что линейные размеры световозвращающих элементов достаточно точно изготовлены: $D = 100 \text{ мкм}$. Положим, что отражатели изготовлены с отклонением углов, равным 10 мин. Тогда, из-за этого возникнет угловое расхождение отраженного от ретрозеркала излучения $\delta\theta_3 \approx L\lambda/D \cdot \theta_{er}/b$, где b — ширина полного ретрозеркала; θ_{er} — ошибка в угле изготовления уголкового отражателей (средняя величина); $L = 10 \text{ м}$ — расстояние, на котором происходит измерение. Проведенная оценка показывает, что $\delta\theta_3 \sim \pm\pi^2/180$ радиан, а также, что ширина отраженно-

го света должна составлять порядка $\pm 3-4$ градуса. Тот экспериментальный факт, что отражение имеет место на больших, чем 4 град. углах, свидетельствует, о том, что угловые неточности, по-видимому, превышают 10 минут, и имеют место также неточности в линейных размерах отражателей. Несимметричность поведения угловых зависимостей коэффициента ретроотражения может быть связана с разной величиной несогласованности углов при вершинах по трем координатам.

В результате проведенного анализа установлено, что отраженная световая волна от ретрозеркала несет информацию об энергетических параметрах света, Подбор источника освещения дает возможность получить достаточно линейную спектральную зависимость энергии в видимой области спектра, падающего на светоотражатель, что обеспечивает эффективное светоотражение в наиболее приемлемой для человеческого глаза области спектра 555 нм. Использование Luxmeter ETI-1301 для измерения светоотражательной способности ретрозеркал обуславливается его спектральным откликом, во многом характерным для человеческого глаза. Нанесение на поверхность светоотражателя фотолюминесцентных красок позволит получить обратный световой поток в определенном спектральном интервале. В этом случае отраженный свет будет нести информацию о цвете.

1. *Jacobs S.F.* Experiments with Retrodirective arrays // *Opt. Engineering*. — 1982. — Vol. 21. — P. 281–285.
2. *Орлов В.К., Вирник Ю.З., Воротилин С.П. и др.* Угловые отражатели для динамической компенсации оптических неоднородностей // *Квант. Электр.* — 1978. — Т. 5. — С. 1389–1393.
3. US Patent 3,684,348. Int. cl. G 02b 5/12. Retroreflective material / William R. Rowland; Aug. 15, 1972.
4. US Patent 6,303, 058, Int. cl. B 29D 011/00. Method of Making Profiled Retroreflective Marking Material / Kelley et. al.; Oct. 16, 2001.
5. US Patent. 5,866,236, Int. cl. B 32B 3/00. Article with Holographic and Retroreflective Features / Faykish et. al.; Feb. 2, 1999.
6. *Eckhardt H.D.* Simple Model of Corner Reflector Phenomena // *Applied Optics*. — 1971. — **10**, N 7. — P. 1559–1566.
7. *Борн М., Вольф Е.* Основы оптики. — М.: Наука, 1970. — 855 с.
8. *Матвеев А.Н.* Оптика. — М.: Высш. шк., 1985. — 351 с.
9. *Сивухин Д.В.* Общий курс физики. Оптика. — М.: Наука, 1980. — 752 с.
10. E-808-81. Standard Practice for Describing Retroreflection. Annual Book of ASTM Standards. — 1981, April 24. — Vol. 0601.

Поступила в редакцию 15.08.2005