

МАТРИЦА РАССЕЯНИЯ И КОЭФФИЦИЕНТЫ ЯРКОСТИ ФОТОМЕТРИЧЕСКИХ ЭТАЛОНОВ МС-20 И МС-14

М. Ю. Сахновский и М. Г. Кунецкий

Определены матрицы яркости эталонных отражателей МС-14 и МС-20 в интервале длин волн 500—790 нм, проведен анализ их отклонения от «идеального» рассеивателя, установлены некоторые закономерности, наблюдающиеся при рассеянии излучения с большой кратностью.

В настоящее время получили широкое распространение в качестве эталонных отражателей фтористо-свинцовые стекла МС-14 и МС-20 [1-5], обладающие стабильными оптическими параметрами, высоким коэффициентом отражения в видимой и ближней ИК области спектра и высокой рассеивающей способностью. В литературе достаточно подробно освещен вопрос о коэффициенте отражения [1, 5], коэффициенте яркости поверхности при облучении естественным пучком [6, 7], об использовании данных отражателей в колориметрии.

При определении поля рассеянного излучения от различных объектов с использованием эталонных отражателей возникает задача учета поляризации излучения. Имеющиеся сведения о матрицах рассеяния отражателей типа МС-14 и МС-20 [8] свидетельствуют о том, что эти материалы не являются «идеальным» рассеивателем и с точки зрения поляризации излучения.

Использование эталонных отражателей при исследованиях поля рассеянного поляризованного излучения возможно только, если известны их матрицы яркости поверхности. Рассмотрению данного вопроса и посвящена настоящая работа.

Отражение поляризованного излучения от рассеивающей поверхности может быть описано с использованием вектор-параметрического представления [9, 10]

$$S_i(\theta, \varphi) = \frac{1}{\pi} \sum_{k=1}^4 \rho_{ik}(\theta, \theta_0, \varphi, \varphi_0) S_k^0(\theta_0, \varphi_0) \cos \theta_0 \Delta \omega_0, \quad (1)$$

где $S_k(\theta_0, \varphi_0)$, $S_i(\theta, \varphi)$ — параметры Стокса облучающего и рассеянных пучков с размерностью лучистой яркости, $\Delta \omega_0$ — телесный угол облучающего пучка; θ, θ_0 — полярные углы, отсчитываемые от нормали к поверхности; φ, φ_0 — азимутальные углы; $\rho_{ik}(\theta, \theta_0, \varphi, \varphi_0)$ — компоненты матрицы яркости поверхности, состоящей в общем случае из 16 элементов. Для идеального рассеивателя матрица взаимодействия с поверхностью имеет всего один отличный от нуля элемент ρ_{11} , равный его коэффициенту отражения.

При отражении естественного излучения [1, 0, 0, 0] в соответствии с выражением (1) получаем, что яркость в произвольном направлении $S_1(\theta, \varphi)$ определяется элементом ρ_{11} , соответствующим коэффициенту яркости поверхности [7] из выражения

$$S_1(\theta, \varphi) = \frac{\rho_{11}}{\pi} S_1^0(\theta_0, \varphi_0) \Delta \omega_0 \cos \theta_0 = \frac{\rho_{11}}{\pi} E_0, \quad (2)$$

где E_0 — облученность поверхности. Наличие остальных параметров Стокса определяется конкретным видом матрицы рассеяния.

Измерение элементов матрицы рассеяния образцов МС-14 и МС-20 проводилось на гониоспектрометрической установке в спектральном интервале 500—790 нм. Поляризатором и анализатором служили призмы Глана, в качестве пластинок $\lambda/4$ — набор слюдяных пластинок на различные длины волн. Измерение яркости поверхности производилось методом силы света. Расстояние от источника и приемника до образца составляло ~ 1.5 м, размер освещаемого участка устанавливался ~ 1.5 —2 см.

Схема отсчета углов изображена на рис. 1. Угловая апертура осветителя и приемника составляла ~ 0.5 —1°.

Определение численных значений коэффициента яркости поверхности (элемент ρ_{11}) проводилось путем сопоставления значений коэффициента отражения, вычисленного на основании распределения тела яркости образца, исследованного на гониоспектрометрической установке, со значениями коэффициента отражения, полученными при измерениях на интег-

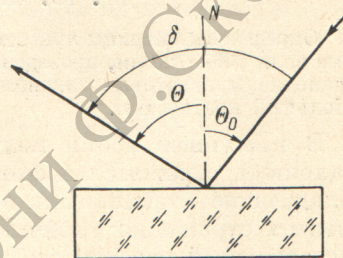


Рис. 1. Схема отсчета углов при измерении матриц рассеяния.

θ_0 — угол падения, θ — угол отражения, δ — угол между направлениями облучения и рассеяния (угол рассеяния), $\delta = \theta_0 - \theta$. Плоскость рассеяния совпадает с нормалью N к поверхности образца. Параметры Стокса облучающих и рассеянных пучков заданы относительно плоскости рассеяния.

ральном фотометре, конструкция которого и методика проведения измерений на нем описаны в работе [11].

Можно показать, что в случае изотропности образца относительно нормали к его поверхности и при угле облучения $\theta_0 = 0^\circ$ для коэффициента яркости ρ_{11} должно выполняться равенство

$$\rho_{11}(\theta^*) = \frac{r}{2 \int_0^{\pi/2} f(\theta) \cos \theta \sin \theta d\theta}, \quad (3)$$

где r — интегральный коэффициент отражения образца при его облучении направленным пучком излучения вдоль нормали к поверхности, $f(\theta)$ — индикатриса яркости поверхности, $\rho_{11}(\theta^*)$ — значение коэффициента яркости для угла θ^* , при котором произведена нормировка индикатрисы, т. е. $f(\theta^*) = 1$.

Выражение (3) было положено нами в основу определения численных значений элемента ρ_{11} матрицы рассеяния. Значения остальных элементов определялись относительно элемента ρ_{11} . Вычисление элементов матрицы рассеяния осуществлялось на основании измерений линейно поляризованных интенсивностей и параметров Стокса рассеянного пучка при различных состояниях поляризации облучающего пучка. Погрешность фотометрирования интенсивности при фиксированном положении поляризатора и анализатора не превышала 0.5%, а с четвертьволновыми пластинками — 1%. Измерение элементов ρ_{11} , ρ_{12} , ρ_{13} , ρ_{21} , ρ_{22} , ρ_{23} , ρ_{31} , ρ_{32} и ρ_{33} производилось без пластинок $\lambda/4$, а остальных элементов матрицы рассеяния — с пластинками $\lambda/4$ и с учетом их пропускания. Относительная погрешность в определении перечисленных элементов матрицы рассеяния составляла при этом 2% и была ниже, чем при определении элементов четвертой строки и четвертого столба ($\sim 4\%$).

На рис. 2 приведены результаты измерений матриц рассеяния образцов МС-14 и МС-20 при угле облучения $\theta_0 = 0^\circ$. Поверхность образцов матировалась абразивом М-5 с последующей обработкой соляной кислотой. Толщина образцов составляла ~ 12 мм. При такой толщине полученные

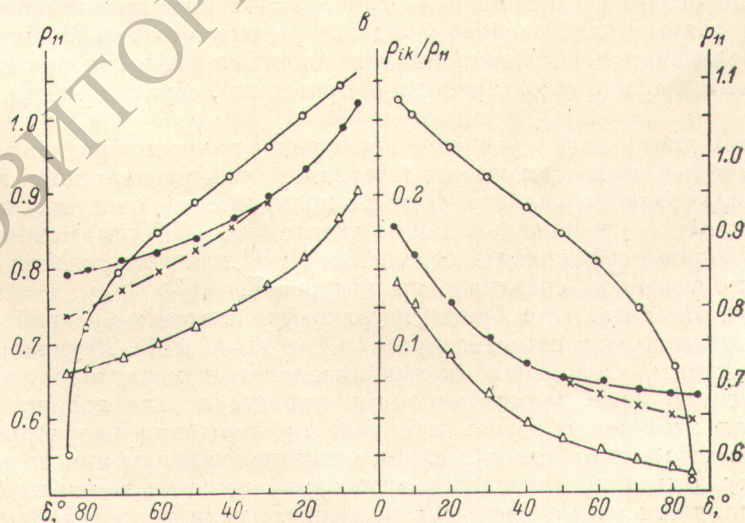
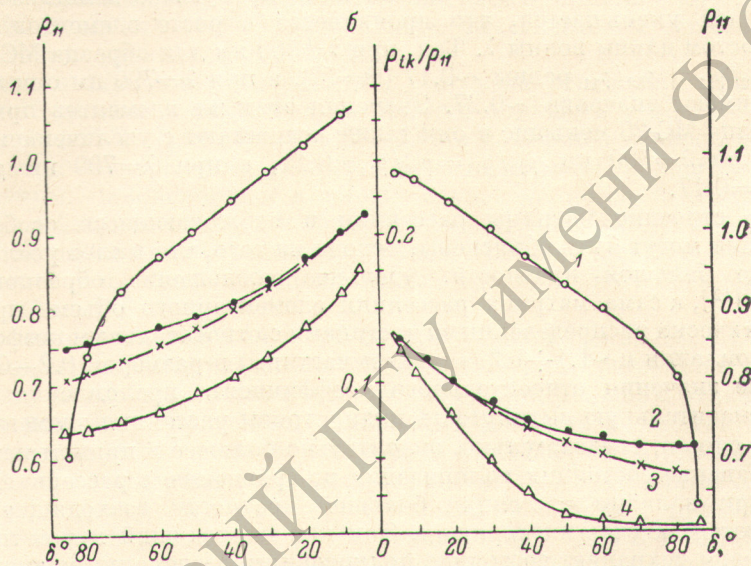
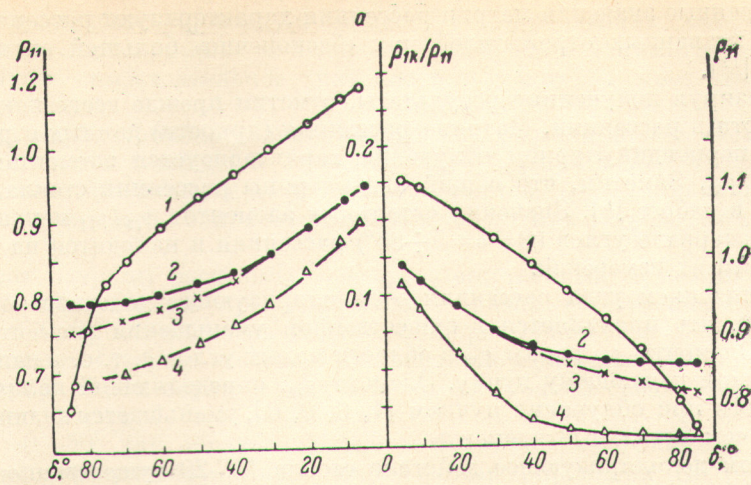


Рис. 2. Элементы матрицы яркости поверхности стекла МС-14 и МС-20 при угле облучения $\theta_0=0^\circ$.

Слева — стекло МС-14, справа — МС-20: а — $\lambda=500$ нм, б — $\lambda=460$ нм, в — $\lambda=790$ нм. 1 — ρ_{11} , 2 — ρ_{22}/ρ_{11} , 3 — ρ_{33}/ρ_{11} , 4 — ρ_{44}/ρ_{11} .

нами численные значения матриц рассеяния характеризуют рассеивающие свойства названных отражателей при «бесконечно» большой оптической толщине [12].

Анализируя полученные результаты, отметим прежде всего некоторые особенности в рассеянии. Матрица рассеяния (яркости) данных отражателей при перпендикулярном облучении характеризуется элементами ρ_{11} , ρ_{22} , ρ_{33} и ρ_{44} . Заметим, что общий вид матрицы рассеяния стекла МС-20 приведен в работе [8]. Значения остальных элементов ρ_{ik}/ρ_{11} меньше 0.02 во всем интервале углов ($\Theta = \delta = 5 \div 85^\circ$) рассеяния и находятся на уровне погрешности их измерений.

С увеличением угла рассеяния σ деполяризующее действие образцов возрастает, что проявляется в существенном уменьшении элементов ρ_{22} , ρ_{33} и ρ_{44} . Элементы ρ_{22} равны ρ_{33} в области малых углов δ , т. е. в направлении, обратном падающему пучку. Элемент ρ_{44} , определяющий наличие эллиптичности при облучении пучком [1, 0, 0, 0], уменьшается значительно быстрее, чем остальные элементы.

В целом деполяризующее действие стекла МС-20 существенно выше, чем у МС-14. С ростом длины волны деполяризующее действие данных отражателей уменьшается, что проявляется в росте элементов ρ_{22} , ρ_{33} и ρ_{44} с ростом длины волны λ . Так, при $\lambda = 500$ нм для образца МС-14 элементы ρ_{22}/ρ_{11} и ρ_{33}/ρ_{11} равны ~ 0.17 ($\Theta = 5^\circ$), а при $\lambda = 790$ нм они соответственно имеют значение ~ 0.27 . Значения этих же элементов при $\Theta = 5^\circ$ для образца МС-20 меньше и они также возрастают с увеличением длины волны: при $\lambda = 500$ нм $\rho_{22}/\rho_{11} = \rho_{33}/\rho_{11} = 0.11$, а при $\lambda = 790$ нм $\rho_{22}/\rho_{11} = \rho_{33}/\rho_{11} = 0.17$.

Такое строение матрицы рассеяния и наблюдающиеся особенности в рассеянии могут быть объяснены, исходя из того, что в слое реализуется рассеяние большой кратности, удельное поглощение образцов мало ($\leq 10^{-3}$) [12], а сама матрица рассеяния элементарного объема представлена хаотически распределенными частицами с относительным коэффициентом преломления $n \sim 1.1 \div 1.2$ («мягкие» частицы) и размером 0.2—0.3 мкм.

Малые значения относительного коэффициента преломления обеспечивают значительную вытянутость индикатрисы рассеяния элементарного объема в слое и, следовательно, значительно большее в прямом направлении сохранение состояния поляризации по сравнению с рассеянием в стороны. При наличии рассеяния большой кратности восходящие пучки формируются за счет нисходящих. Так как нисходящий пучок наибольшим образом сохраняет состояние поляризации, а элементы матрицы рассеяния элементарного объема $F_{12} = F_{21}$ и $F_{34} = -F_{43}$ в направлении «вперед» и «назад» равны нулю, следует ожидать при отражении в заднюю полусферу проявления наибольших поляризационных эффектов прежде всего для элементов ρ_{22} , ρ_{33} и ρ_{44} (рис. 2) в направлении, обратном облучающему пучку.

С ростом длины волны удельное поглощение данных образцов увеличивается, уменьшается кратность рассеяния и поляризационные характеристики проявляются сильнее. О росте поглощающей способности исследуемых стекол с увеличением длины волны (500—1000 нм) можно судить по уменьшению коэффициента отражения [1, 11] для исследуемых отражателей в приведенном спектральном интервале.

Следует отметить, что в ближней ультрафиолетовой и в синей области спектра, где коэффициенты отражения стекол МС-14 и МС-20 уменьшаются, следует ожидать увеличения их поляризационных характеристик.

Совершенно иные поляризационные характеристики должны наблюдаться для этих же образцов в случае прохождения излучения через большие оптические толщины (т. е. при возникновении глубинного режима). Поскольку одним из основных требований возникновения глубинного режима является условие пренебрежительной роли первоначально облучающего пучка, то, исходя из условий симметрии относительно нормали к поверхности образца, следует, что в этом направлении всякие поляризационные эффекты должны отсутствовать. Их проявления главным образом

в наличии элемента ρ_{21} следует ожидать в направлениях, существенно отличающихся от нормали к поверхности образца. Рассмотрение этого случая имеет самостоятельное значение и выходит за пределы данной работы.

Весьма характерной особенностью матриц рассеяния образцов МС-14 и МС-20 является совпадение элементов ρ_{22} и ρ_{33} при малых углах $\delta = \Theta$. Этот результат объясняется отсутствием элементов $\rho_{12} = \rho_{21}$ и равноправием отраженных линейно поляризованных компонент при устремлении к нулю угла δ .

Элемент матрицы рассеяния $\rho_{12} = \rho_{21}$, ответственный за возникновение линейной поляризации при облучении образца естественным пучком света [1, 0, 0, 0], возникает из-за различия в рассеянии \parallel - и \perp -компонент. В направлении «вперед» и «назад» это различие при наличии сферических частиц или в общем случае статистически изотропной среды отсутствует.

Следует отметить, что равенство нулю элемента $\rho_{12} = \rho_{21}$ в области углов $\Theta = 0 \div 50^\circ$ для образцов МС-20 выполняется с точностью $\sim 0.5\%$, т. е. лежит на уровне случайных ошибок фотометрирования. Поэтому в области углов отражения $0 \div 50^\circ$ при облучении вдоль нормали к поверхности образец МС-20 можно считать «идеальным» рассеивателем естественного пучка с точки зрения поляризации.

Значения и зависимость элемента ρ_{11} от угла отражения приведены на рис. 2. Изменение коэффициентов яркости в области углов $\Theta = 0 \div 70^\circ$ составляет $20 \div 25\%$. Для образцов МС-20 это изменение меньше, чем для МС-14, причем спектральные различия в исследованной области спектра незначительны. Закономерным в данном случае является то обстоятельство, что коэффициент яркости в области углов отражений $\Theta = 46 \pm 1^\circ$ соответствуют коэффициенту отражения образца. Наличие подобного рода закономерностей у плоских образцов с малым удельным поглощением отмечается в работе [7].

Облучение образцов МС-14 и МС-20 при углах падения Θ_0 , отличных от нуля, видоизменяет приведенный выше вид матрицы рассеяния, причем это различие становится весьма значительным при больших углах облучения. На рис. 3 и 4 приведены измеренные значения элементов матриц рассеяния стекол МС-14 и МС-20 при длинах волн 500, 640 и 790 нм и угле падения $\Theta_0 = 70^\circ$. Матрица рассеяния (яркости) имеет отличные от нуля элементы ρ_{11} , $\rho_{12} = \rho_{21}$, ρ_{22} , ρ_{33} и ρ_{44} . Остальные элементы с точностью до погрешностей эксперимента ($2 \div 4\%$) равны нулю. Образец МС-20, как и при перпендикулярном облучении, проявляет большую деполаризующую способность, чем образец МС-14, причем она возрастает с уменьшением длины волны. Можно заключить, что в исследованном интервале длин волн 500 \div 790 нм для стекла МС-20 все элементы матрицы рассеяния ρ_{ik} меньше 0.1 ρ_{11} в области углов рассеяния $\delta = 0 \div 90^\circ$ и соответственно $\Theta = 70 \div -20^\circ$. Для стекла МС-14 эти значения оказываются в два раза выше.

Весьма характерным для указанных отражателей является значительное возрастание элементов ρ_{22} , ρ_{33} , ρ_{44} и $\rho_{12} = \rho_{21}$ в области углов рассеяния $\delta \geq 100^\circ$ и отрицательные значения элементов ρ_{12} , ρ_{33} и ρ_{44} . Такое поведение этих элементов вызвано возрастающей ролью доли излучения, обусловленной взаимодействием с шероховатой поверхностью образца и, следовательно, ослаблением роли многократно рассеянной компоненты излучения, обусловленной взаимодействием с его объемом. Действительно, при рассеянии на шероховатых поверхностях характерным является существенное возрастание элементов $\rho_{33} \approx \rho_{44}$ с увеличением угла рассеяния δ [13].

Наличие положительных значений $\rho_{12} = \rho_{21}$ в области малых углов рассеяния δ обусловлено поляризующим действием поверхности при преломлении и выходе многократно рассеянной компоненты (здесь \parallel -компонента должна преобладать над \perp -компонентой).

В области больших углов рассеяния δ , близких к удвоенному значению угла Брюстера, отрицательные значения элемента $\rho_{12} = \rho_{21}$ обуслов-

лены преобладающей ролью \perp -компоненты на \parallel -компонентой при отражении облучающего пучка от шероховатой поверхности. Экстремальные значения этого элемента в области углов δ , близких к удвоенному углу зеркального отражения, обусловлены, по-видимому, наличием наибольшего числа микроплощадок, параллельных плоскости образца.

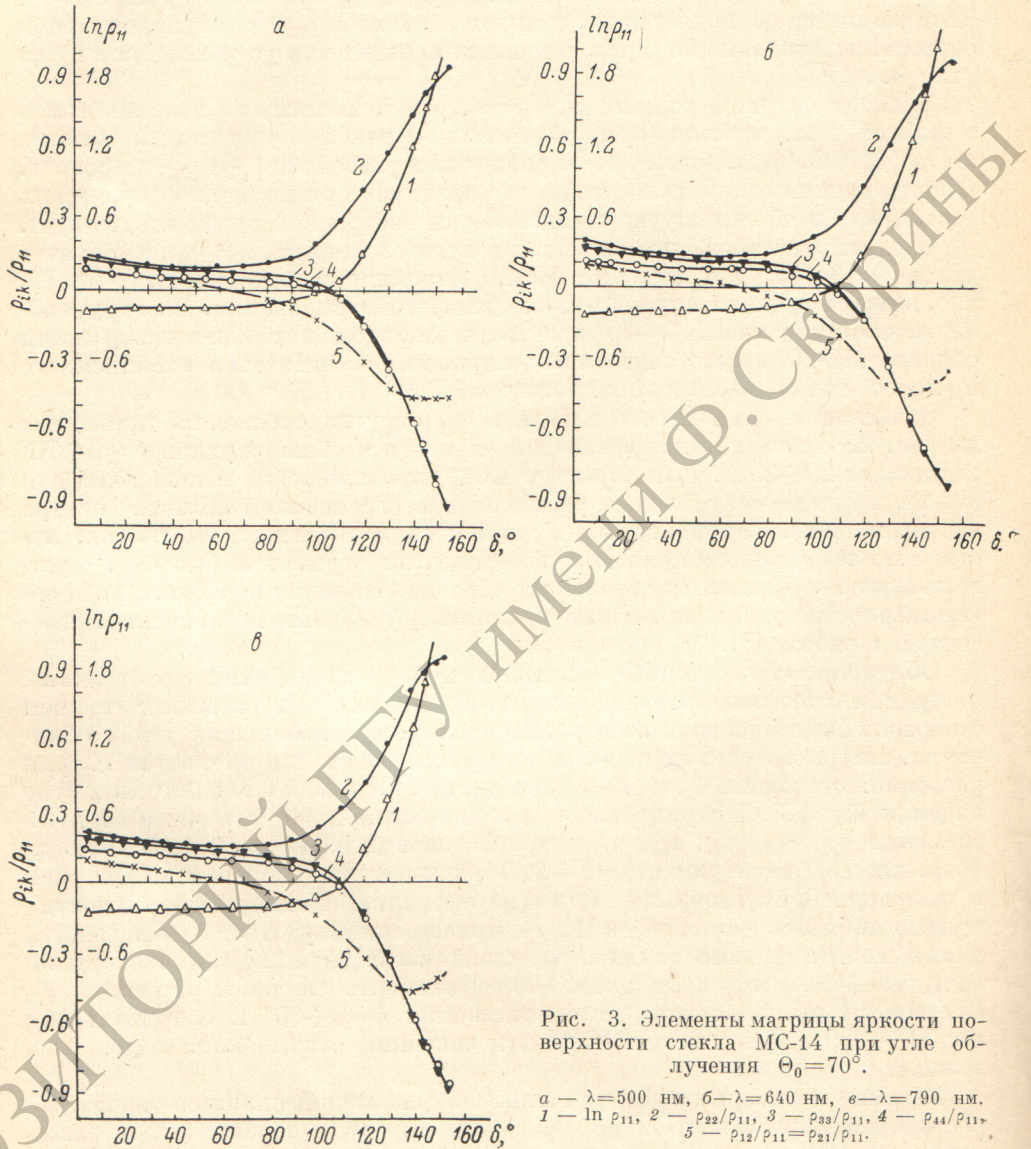


Рис. 3. Элементы матрицы яркости поверхности стекла МС-14 при угле облучения $\Theta_0 = 70^\circ$.

$a - \lambda = 500$ нм, $б - \lambda = 640$ нм, $в - \lambda = 790$ нм.
 1 - $\ln \rho_{11}$, 2 - ρ_{22}/ρ_{11} , 3 - ρ_{33}/ρ_{11} , 4 - ρ_{44}/ρ_{11} ,
 5 - $\rho_{12}/\rho_{11} = \rho_{21}/\rho_{11}$.

Полученные в работе экспериментальные результаты убедительно свидетельствуют в пользу выполнения принципа взаимности для плоских объектов с большой кратностью рассеяния и имеющих явные границы раздела. Этот принцип, как известно [10], сводится к утверждению, что матрица яркости поверхности будет идентичной, если поменять местами облучающий и рассеянные пучки. Выполнение принципа взаимности для случая плоского образца с большой кратностью рассеяния вытекает из условия взаимности матрицы рассеяния элементарного объема. Условие изотропности матрицы элементарного объема, как известно [14], наряду с выполнением принципа взаимности достигается в общем случае благодаря наличию случайно ориентированных частиц и им зеркальных в равных количествах. Рассеивающие центры стекол МС-14 и МС-20 естественно

удовлетворяют этим условиям. Наличие явной границы раздела у исследованных образцов в виде шероховатой поверхности не нарушает принципа взаимности, так как сама шероховатая поверхность удовлетворяет этому принципу для лучей, плоскость рассеяния которых совпадает с нормалью к поверхности [13].

Сопоставляя результаты, изображенные на рис. 2, 3 и 4, можно убедиться в равенстве всех элементов матрицы рассеяния для углов $\delta=70^\circ$

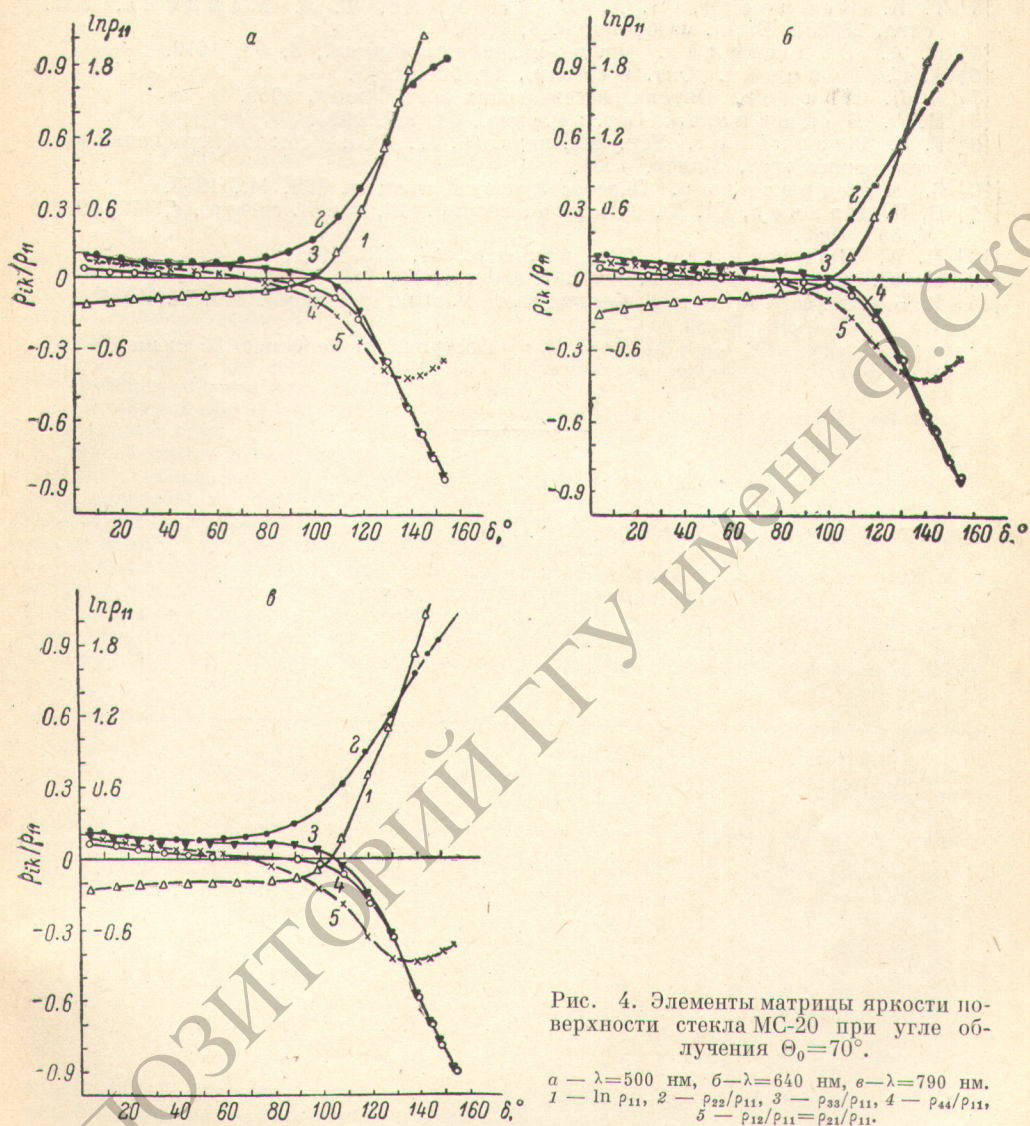


Рис. 4. Элементы матрицы яркости поверхности стекла МС-20 при угле облучения $\Theta_0=70^\circ$.

$a - \lambda=500$ нм, $б - \lambda=640$ нм, $в - \lambda=790$ нм.
 1 — $\ln \rho_{11}$, 2 — ρ_{22}/ρ_{11} , 3 — ρ_{33}/ρ_{11} , 4 — ρ_{44}/ρ_{11} ,
 5 — $\rho_{12}/\rho_{11} = \rho_{21}/\rho_{11}$.

и соответственно $\Theta=0^\circ$, $\Theta=70^\circ$ и $\Theta_0=70^\circ$, $\Theta=0^\circ$. Характерно, что элемент ρ_{12} на рис. 3 и 4 изменяет знак в области углов рассеяния $\delta=70^\circ$ (это так же соответствует рис. 2, где эти элементы не изображены ввиду их малости). Отметим, что принцип взаимности может быть использован при исследованиях матриц рассеяния при произвольных углах облучения Θ_0 . Численные значения коэффициентов яркости для определенных значений углов δ и Θ могут быть взяты из данных, полученных при облучении образца вдоль нормали к его поверхности.

Полученные в работе экспериментальные результаты раскрывают ряд закономерностей в рассеянии излучения молочными стеклами типа МС-14 и МС-20. Результаты работы могут быть использованы при расчете поля

рассеянного этими отражателями излучения, оценке погрешностей, обусловленных их отступлением от свойств идеального рассеивателя.

Литература

- [1] Н. А. Войшвилло, М. Н. Смолкин. *Опт. и спектр.*, 16, 905, 1964.
- [2] Н. А. Войшвилло. *Опт. и спектр.*, 12, 443, 1962.
- [3] Т. И. Вейнберг, Н. А. Войшвилло, Г. А. Махлина. *Авт. свид.* 143522, *Бюлл. изобретений*, 21, 1961.
- [4] Т. И. Вейнберг, Н. А. Войшвилло, Г. А. Махлина. *Авт. свид.* 235256, *Бюлл. изобретений*, 5, 1969.
- [5] Н. А. Войшвилло. *Оптико-механич. промышл.*, 5, 63, 1972.
- [6] А. С. Топорец. *Опт. и спектр.*, 18, 704, 1965.
- [7] А. П. Иванов. *Оптика рассеивающих сред*. Минск, 1969.
- [8] Н. А. Войшвилло. *Опт. и спектр.*, 38, 777, 1975.
- [9] Г. В. Розенберг. *Усп. физ. наук*, 56, 77, 1955; в сб.: *Спектроскопия рассеивающих сред*, Минск, 1963.
- [10] С. Чандрасекар. *Перенос лучистой энергии*. ИЛ, М., 1953.
- [11] В. П. Рвачев, М. Ю. Сахновский. *Ж. прикл. спектр.*, 4, 172, 1966; 4, 568, 1966.
- [12] Н. А. Войшвилло. *Опт. и спектр.*, 31, 275, 1971.
- [13] М. Ю. Сахновский. *Опт. и спектр.*, 32, 786, 1972.
- [14] Г. Ван де Хюлст. *Рассеяние света малыми частицами*. ИЛ, М., 1961.

Поступило в Редакцию 25 июня 1976 г.

