

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МНОГОКРАТНОГО РАССЕЯНИЯ В СРЕДЕ С КООПЕРАТИВНЫМ ХАРАКТЕРОМ ОДНОКРАТНОГО РАССЕЯНИЯ

Н. А. Войшвилло

Измерены коэффициенты яркости, отражения, диффузного и направленного пропускания плоских слоев натровоборосиликатного стекла, в котором реализуется кооперативное рассеяние, и прослежено их изменение по мере нарастания оптической толщины. Показано, что закон Бугера выполняется. На основе анализа экспериментальных результатов даны приближенные аналитические аппроксимации зависимостей коэффициентов яркости и отражения от толщины. Найденные закономерности аналогичны тем, которые наблюдаются в некогерентно рассеивающих средах.

Одним из актуальных вопросов оптики рассеивающих сред является когерентное рассеяние, наблюдаемое при плотной упаковке рассеивающих неоднородностей. Закономерности когерентного (или кооперативного) рассеяния света, при котором происходит интерференционное взаимодействие излучения, рассеянного разными неоднородностями, определяются структурой (размером и показателем преломления отдельных неоднородностей, их взаимным расположением) каждого конкретного рассеивающего объекта. Математическое описание однократного рассеяния с учетом кооперативных эффектов представляет собой сложную математическую задачу [1-4], но принципиальных затруднений не вызывает. Гораздо сложнее обстоит дело с многократным рассеянием излучения в такой среде. Здесь и по настоящее время дискутируется вопрос о применимости к плотноупакованным системам основного математического аппарата описания многократного рассеяния — уравнения переноса излучения [5-7]. В связи с этим не вызывает сомнения важность экспериментального исследования многократного рассеяния в средах, в которых реализуется кооперативное однократное рассеяние.

Объектами исследования служили плоские слои различной толщины z (от 0.34 до 12.3 мм) натровоборосиликатного стекла, структура которого представляет собой плотноупакованную систему двух стеклообразных разных по составу, но примерно равных по объему фаз [8-10]. Размеры неоднородностей разных фаз близки между собой и меньше или соизмеримы с длиной волны (в зависимости от тепловой обработки стекла). Относительный показатель преломления фаз не превосходит нескольких единиц второго знака после запятой. Однократное рассеяние света в натровоборосиликатном стекле исследовалось многими авторами [11-20], которыми было показано, что кооперативный характер рассеяния в этом стекле проявляется в особых (названных аномальными) свойствах рассеянного излучения: во-первых, в резко выраженной спектральной зависимости светорассеяния и, во-вторых, индикатрисе рассеяния необычного вида.

В настоящем сообщении излагаются результаты изучения зависимости от оптической толщины τ слоя натровоборосиликатного стекла таких важных оптических характеристик, как спектральные коэффициенты отражения, направленного пропускания t_r и яркости излучения, вышедшего из слоя стекла, а также интегрального коэффициента диффузного пропускания T . Измерения производились при помощи спектрофотометра СФ-2, а также установок, описанных в [21, 22]. Измерения коэффициентов отражения R и яркости выполнялись при искусственном устранении действия границ стекло—воздух, что достигалось благодаря применению методики, описанной в [17, 23]. Оптическая толщина образцов τ , соответствующая средней части видимого спектра, менялась от 1.5 до 57 (показатель рассеяния $\sigma(550) = 43 \text{ см}^{-1}$), что определило реализацию в образ-

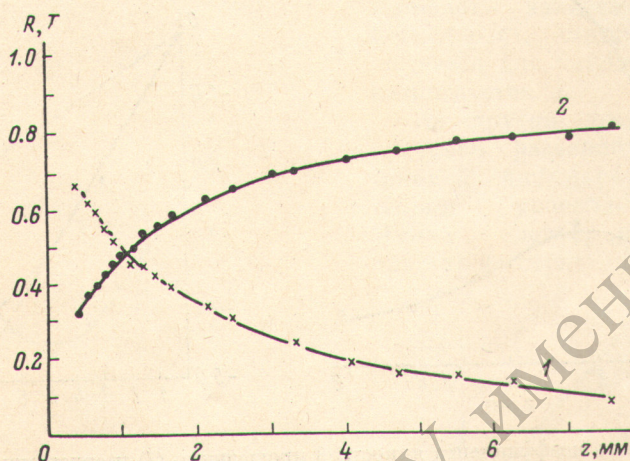


Рис. 1. Зависимость от толщины слоя коэффициента диффузного пропускания (1) и коэффициента отражения (2); $\lambda = 550 \text{ нм}$.

цах разной толщины рассеяния света различной кратности, начиная от однократного.

На рис. 1 представлены зависимости коэффициента отражения и интегрального коэффициента пропускания от толщины образцов, измеренные при $\lambda = 550 \text{ нм}$. Как видно из рис. 1, для коэффициента пропускания характерен монотонный спад по мере нарастания толщины слоя, а коэффициент отражения с ростом толщины сначала резко увеличивается, а затем наступает явление, подобное «насыщению», когда увеличение толщины слоя не приводит к заметному повышению отражения. Таким образом, качественная картина изменения коэффициентов диффузного пропускания и отражения с толщиной слоя аналогична картине, наблюдаемой при некогерентном рассеянии света. То же можно сказать и о характере зависимости от толщины коэффициента яркости $\beta = f(\tau)$ (рис. 2) для излучения, рассеянного как в переднюю полусферу, так и в заднюю. Здесь обращает на себя внимание наличие максимума яркости прошедшего излучения при определенной оптической толщине слоя. В опубликованных как теоретических, так и экспериментальных работах [24–27] был установлен факт существования максимума кривой $\beta = f(\tau^*)$ при изучении распределения яркости в глубине рассеивающей среды, причем τ^* — не общая толщина слоя (как в описываемых опытах с образцами натровоборосиликатного стекла), а глубина в толще рассеивающей среды. Для излучения, вышедшего из слоя, зависимость $\beta = f(\tau)$ (где τ — полная оптическая толщина слоя) с максимумом была обнаружена у светорассеивающих стекол [28], обладающих некогерентным характером однократ-

ного рассеяния. Как видно, натровоборосиликатное стекло в этом отношении не является исключением среди светорассеивающих стекол.

На рис. 3 представлена зависимость спектрального коэффициента направленного пропускания t_r от толщины слоя, которая дает возможность судить о применимости закона Бугера к натровоборосиликатному стеклу. На рис. 1 кривая 1 по сравнению с кривой 2 соответствует большим оптическим толщинам (при одинаковой геометрической толщине z , отложенной по оси абсцисс), так как $\sigma(550) > \sigma(635)$. Из представленных экспериментальных результатов следует, что закон экспоненциального

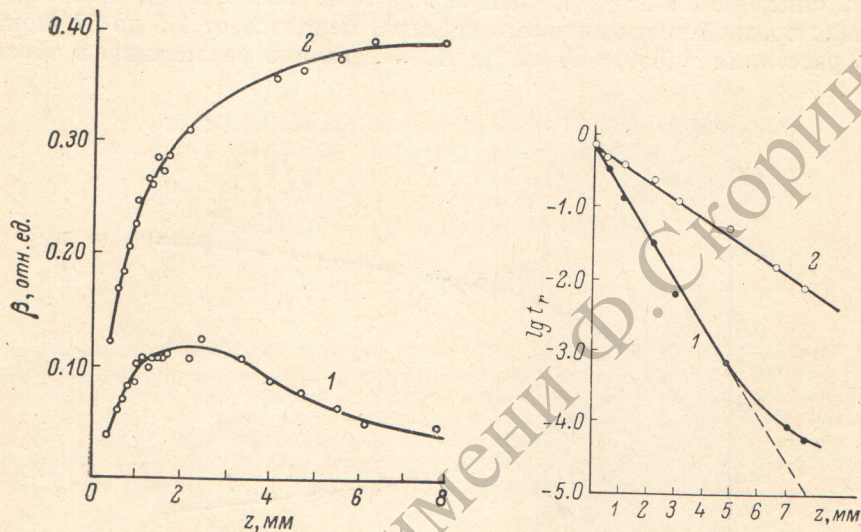


Рис. 2. Зависимость коэффициента яркости β прошедшего (1) и отраженного (2) излучения от толщины образцов.

Угол рассеяния как в передней, так и в задней полусфере равен 30° , $\lambda=546$ нм.

Рис. 3. Зависимость логарифма коэффициента направленного пропускания от толщины образцов.

λ , нм: 1 — 550; 2 — 635.

ослабления прямо прошедшего излучения в слоях натровоборосиликатного стекла приблизительно сохраняется до оптической толщины $\tau \approx 18$, и отступления от него, как это обычно и имеет место, начинаются при больших оптических толщинах.

Далее попытаемся на основе анализа экспериментальных результатов установить аналитический вид закономерностей, которыми можно приближенно описать экспериментальные зависимости. Анализ результатов показал, что в отдельных диапазонах оптических толщин экспериментальная зависимость коэффициента яркости от толщины может быть описана выражением (при $\tau > 13$)

$$1/\beta = a + b\tau \quad (1)$$

(рис. 4), а коэффициента отражения (рис. 5) выражением

$$\frac{R}{1-R} = c + d\tau. \quad (2)$$

Найденный вид зависимостей вытекает из теории многократного рассеяния в слабопоглощающих рассеивающих средах при определенных диапазонах оптических толщин. Действительно, в асимптотической теории многократного рассеяния [29] при толщине слоя $\epsilon'z \ll 1$, где ϵ' —

глубинный показатель ослабления, для яркости прошедшего излучения дана формула

$$\beta(\gamma, \alpha, \tau) = \frac{u_0(\gamma) u_0(\alpha)}{\left(1 - \frac{\omega_1}{3}\right) \tau + \delta},$$

где

$$\delta = 4 \int_{\pi/2}^0 u_0(\gamma) \cos^2 \gamma \sin \gamma d\gamma.$$

Здесь γ — угол рассеяния, α — угол падения освещающего пучка, ω_1 — коэффициент при первом полиноме Лежандра в разложении индикатрисы элементарного объема в ряд по этим полиномам.

Из указанной формулы вытекает зависимость вида $1/\beta = A + B\tau$, которая и наблюдается для натровоборосиликатного стекла.

Из другой теории многократного рассеяния — двухпоточковой двухпараметрической теории Гуревича — Кубелки — Мунка — следует при $\varepsilon'z \ll 1$ простая формула, описывающая

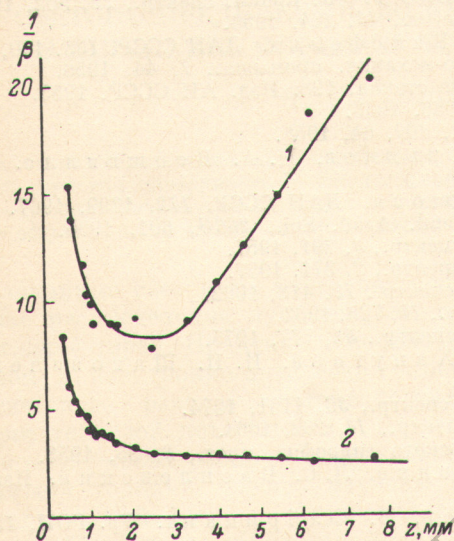


Рис. 4. Зависимость функции $1/\beta$ от толщины образцов.

Угол рассеяния как в передней полусфере (1), так и в задней (2) равен 20° ; $\lambda = 546$ нм.

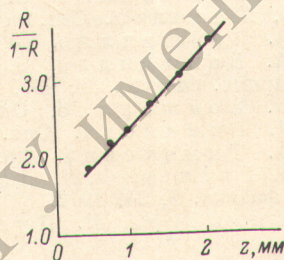


Рис. 5. Зависимость функции $R/(1-R)$ от толщины образцов; $\lambda = 550$ нм.

закономерность изменения с толщиной коэффициента отражения: $R/(1-R) = \varepsilon'z$. Эта формула также хорошо согласуется с экспериментальными результатами, полученными для натровоборосиликатного стекла.

Необходимо отметить, что закономерности изменения коэффициентов отражения и яркости вида (1) и (2) наблюдались [28] у других марок светорассеивающих стекол, не обладающих кооперативным характером рассеяния.

Таким образом, при достаточно больших оптических толщинах, когда доля однократно рассеянного света становится малой, закономерности, определяющие зависимость от толщины ряда основных характеристик светорассеяния натровоборосиликатного стекла, подобны тем, которые наблюдаются в некогерентно рассеивающих средах и которые вытекают из уравнения переноса излучения при выполнении некоторых упрощающих допущений относительно свойств рассеивающей среды. Представляется, что этот результат имеет принципиальное значение и может оказаться полезным при рассмотрении вопроса о применимости уравнения переноса излучения к системе коррелированных рассеивателей — вопроса, еще не получившего окончательного решения. Полученный результат позволяет считать, что интерференционное взаимодействие световых волн, рассеян-

ных системой коррелированных неоднородностей, которое, безусловно, влияет на характеристики однократного рассеяния (показатель рассеяния и индикатрису рассеяния), не меняет характера закономерностей многократного рассеяния, вытекающих из уравнения переноса излучения.

Литература

- [1] W. Trinks. *Ann. Phys.*, **22**, 561, 1935.
- [2] О. А. Гермогенова. *Изв. АН СССР, сер. физ. атмосф. и океана*, **1**, 227, 1965.
- [3] G. O. Olaofe. *Appl. Opt.*, **9**, 421, 1970.
- [4] К. С. Шифрин. *Рассеяние света в мутной среде*. ГИТТЛ, М., 1951.
- [5] Ю. Н. Барабаненков, В. М. Финкельберг. *ЖЭТФ*, **53**, 978, 1967.
- [6] Ю. Н. Барабаненков. *ДАН СССР*, **174**, 53, 1967.
- [7] А. П. Иванов, В. Г. Данилюк. *Ж. прикл. спектр.*, **22**, 302, 1975.
- [8] F. Oberlies. *Naturwissenschaften*, **43**, 224, 1956.
- [9] В. М. Шелюбский, Н. М. Вайсфельд. *ДАН СССР*, **138**, 100, 1961.
- [10] Н. А. Войшвилло. *Оптико-механич. промышл.*, **7**, 44, 1956.
- [11] Д. И. Левин. В сб.: *Строение стекла*, 198. Изд. АН СССР, 1955.
- [12] М. М. Гуревич. *ЖТФ*, **23**, 986, 1953.
- [13] А. И. Колядин. *ДАН СССР*, **109**, 64, 1956.
- [14] Н. С. Андреев, В. Н. Аверьянов, Н. А. Войшвилло. *ФТТ*, **2**, 1011, 1960.
- [15] Н. С. Андреев, Т. И. Ершова. *ДАН СССР*, **172**, 1299, 1967.
- [16] L. Prod'homme. *Compt. Rend. Acad. Sci.*, **266B**, 601, 1966.
- [17] Н. А. Войшвилло. *Опт. и спектр.*, **3**, 291, 1957.
- [18] Н. А. Войшвилло. *Опт. и спектр.*, **2**, 371, 1957.
- [19] Н. А. Войшвилло. *Опт. и спектр.*, **12**, 412, 1962.
- [20] А. В. Шатилов. *Опт. и спектр.*, **12**, 728, 1962.
- [21] Н. А. Войшвилло. *Опт. и спектр.*, **38**, 777, 1975.
- [22] Н. А. Войшвилло, Э. И. Хапугина, И. И. Шаповаленко. *Ж. прикл. спектр.*, **31**, 937, 1979.
- [23] Н. А. Войшвилло. *Опт. и спектр.*, **36**, 1161, 1974.
- [24] Л. М. Романова. *Опт. и спектр.*, **14**, 262, 1963.
- [25] В. А. Тимофеева. *Тр. морского гидрофиз. инст.*, **3**, 35, 1953.
- [26] В. П. Рвачев, Ф. П. Довженко, Л. С. Василевский. *Изв. вузов, физика*, **1**, 34, 1972.
- [27] В. Гинзбург, В. Пульвер, В. Фабрикант. *Тр. ГОИ*, **11**, 24, 1936.
- [28] Н. А. Войшвилло. *Опт. и спектр.*, **42**, 949, 1977.
- [29] В. В. Соболев. *Перенос лучистой энергии в атмосферах звезд и планет*. 391. Гостехиздат, М., 1956.

Поступило в Редакцию 23 ноября 1979 г.
В окончательной редакции 20 ноября 1980 г.