

## КООПЕРАТИВНЫЕ ЭФФЕКТЫ НА ШЕРОХОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ В ПРОХОДЯЩЕМ ИЗЛУЧЕНИИ

В. К. Полянский и И. Б. Котлярова

Исследованы условия появления и развития прямого регулярного пучка в потоке излучения, прошедшем через шероховатую поверхность раздела фаз. Аналитические результаты сопоставлены с экспериментом, выполненном на односторонне матированных стеклянных пластинах. Определена эффективная глубина микрорельефа исследованных образцов. Явление трактуется с позиций представлений о кооперативных эффектах.

В последние годы опубликован ряд работ, посвященных исследованию условий возникновения и развития регулярного пучка при отражении света шероховатой поверхностью [1-6]. Формирование такого регулярного или зеркального пучка следует связывать с нарушением предположения об аддитивности интенсивностей парциальных пучков, порожденных различными участками микрорельефа. Эти пучки оказываются в той или иной степени скоррелированными по фазе. Возникновение регулярного пучка в потоке рассеянного излучения следует рассматривать как проявление кооперативных эффектов.

Легко показать [7], что при нормальном облучении шероховатой поверхности кооперативные эффекты в проходящем излучении должны обнаруживаться легче и проявляться сильнее, чем в отраженном. Прямой нерассеянный пучок становится заметным, если оптическая глубина неровностей поверхности оказывается сравнимой с длиной волны света  $\lambda$  или меньшей. Амплитуду такого регулярного пучка можно описать выражением

$$A = A_0 \int_0^H F(h) e^{-iqh} dh. \quad (1)$$

В этом выражении  $A_0$  — модуль амплитуды, которая осуществлялась бы в случае полированной поверхности,  $H$  — глубина микрорельефа,  $F(h)$  — функция распределения элементов поверхности по глубине,

$$q = \frac{2\pi}{\lambda} (n_2 - n_1), \quad (2)$$

$n_1$  и  $n_2$  — показатели преломления разграничиваемых поверхностью сред.

Мы не располагаем какими-либо данными для априорного выбора аналитического выражения, описывающего функцию  $F(h)$ . Однако относительное уменьшение  $H$ , соответствующее уменьшению показателя преломления  $n_2/n_1$ , либо увеличению длины волны света  $\lambda$ , снижает критичность результатов эксперимента или расчета к конкретному виду этой функции. Ограничим рассмотрение случаев малых  $H$ , при которых существует регулярный пучок; исходя из отмеченного и руководствуясь соображениями простоты вычислений, распределение  $F(h)$  можем считать равномерным

$$F(h) = 1/H. \quad (3)$$

Тогда для амплитудного коэффициента пропускания получаем

$$\tau = \frac{A}{A_0} = \frac{1}{iqH} \{1 - e^{-iqH}\}, \quad (4)$$

и для энергетического коэффициента пропускания

$$T = \frac{I}{I_0} = \frac{\sin^2 \frac{\pi (n_2 - n_1)}{\lambda} H}{\left[ \frac{\pi (n_2 - n_1)}{\lambda} H \right]^2}. \quad (5)$$

Значение  $H$ , которое следует из последнего соотношения, соответствует некоторой осредненной эффективной глубине микрорельефа шероховатой поверхности.

Экспериментально измерена интенсивность регулярного проходящего пучка света для нескольких образцов матового стекла, подготовленного механическим способом с применением абразивов с размерами зерна 10, 14, 20 и 28 мкм. Эксперимент выполнялся при фиксированной длине волны света  $\lambda = 546$  нм. Показатель преломления  $n_2/n_1$  изменялся в широких пределах; изменение относительного показателя преломления при неизменной функции распределения достигалось применением иммерсионной жидкости, которая вводилась в узкое пространство между матовой поверхностью исследуемого образца и хорошо полированным покровным стеклом. Показатель преломления стекла  $n_2 = 1.530$ ; показатели преломления используемых иммерсионных составов, какими служили водные растворы глицерина, 1.333, 1.354, 1.364, 1.384, 1.396, 1.417, 1.432, 1.456, 1.470. Интенсивность регулярного пучка определялась от уровня фона, обусловленного диффузным рассеянием. Нормировка производилась по данным, полученным в эксперименте с полированным стеклом

| Иммерсия | Образцы |       |        |        |
|----------|---------|-------|--------|--------|
|          | М-10    | М-14  | М-20   | М-28   |
| 1.333    | 0.269   | 0.118 | 0.0306 | 0.0186 |
| 1.354    | 0.332   | 0.189 | 0.0679 | 0.0465 |
| 1.364    | 0.358   | 0.212 | 0.0816 | 0.0745 |
| 1.384    | 0.444   | 0.302 | 0.151  | 0.113  |
| 1.396    | 0.507   | 0.360 | 0.206  | 0.156  |
| 1.417    | 0.623   | 0.520 | 0.315  | 0.282  |
| 1.432    | 0.694   | 0.574 | 0.443  | 0.386  |
| 1.456    | 0.840   | 0.768 | 0.647  | 0.608  |
| 1.470    | 0.870   | 0.850 | 0.760  | 0.720  |

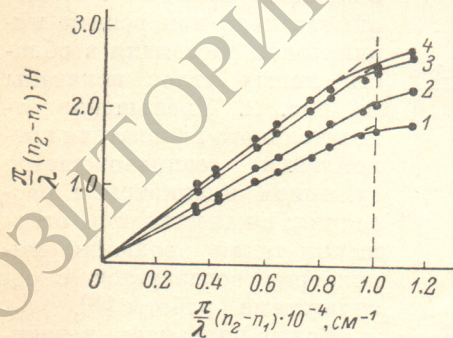


Рис. 1.

1 — М-10, 2 — М-14, 3 — М-20, 4 — М-28.

такое представление закономерности, выражаемой соотношением (5), куда бы  $H$  входило линейно.

Перепишем последнее соотношение в виде

$$\sqrt{T} = |\tau| = \frac{\sin \frac{\pi (n_2 - n_1)}{\lambda} H}{\frac{\pi (n_2 - n_1)}{\lambda} H} = \frac{\sin \frac{q}{2} H}{\frac{q}{2} H}. \quad (6)$$

Если теперь по оси абсцисс прямоугольной системы координат отложить значения  $q/2$ , а по оси ординат — значения аргументов  $qH/2$ , которые находятся по таблицам функций  $\sin \xi/\xi$  [8] с использованием корней квадратных из экспериментально измеренных интенсивностей, точки на

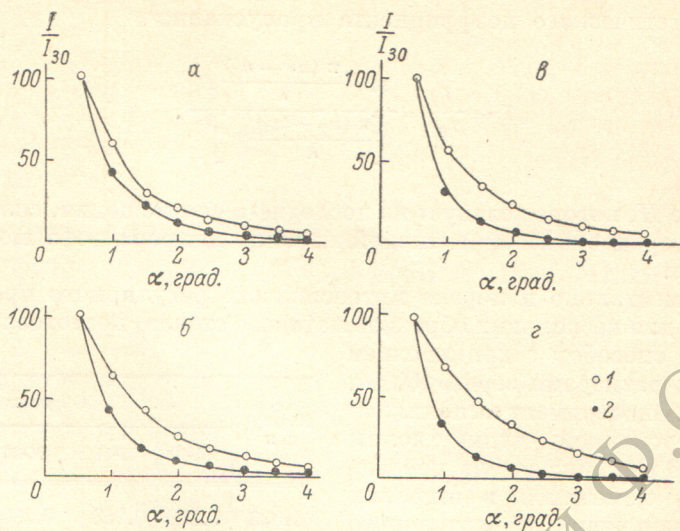


Рис. 2. Индикатрисы рассеяния.

а — М-10, б — М-14, в — М-20, г — М-28. 1 —  $n_1 = 1.333$ , 2 —  $n_1 = 1.470$ .

графике должны лечь примерно на прямую, тангенс угла наклона которой равен эффективному значению глубины микрорельефа.

Обработанные описанным способом результаты приведены на рис. 1. Экспериментально определяемая или эффективная глубина микрорельефа для образцов М-10, М-14, М-20, М-28 составляет соответственно 1.8, 2.07, 2.57 и 2.79 мкм.

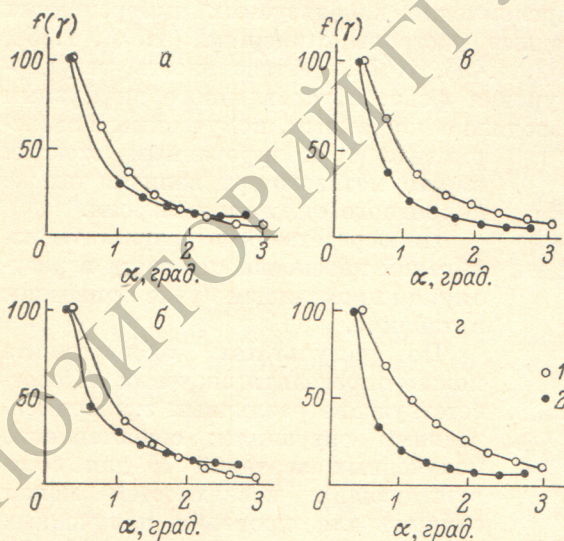


Рис. 3. Эффективные функции распределения элементов поверхности по направлениям, определяемые соответственно [9]. Обозначения те же, что и на рис. 2.

распределения получаются различными при различных иммерсиях (рис. 3). Наблюдается «завал» функции распределения в области малых углов по сравнению с ее асимптотическим значением, которое получается при отсутствии иммерсии. Тем не менее действительная функция распре-

Диффузный фон измерен в области углов до  $4^\circ$ . Экспериментально измеренные индикатрисы рассеяния в области малых углов показаны на рис. 2. Уменьшение относительного показателя преломления сопровождается сужением индикатрисы рассеяния; в качественном отношении такая эволюция индикатрис согласуется с результатами работы [9].

Если, пользуясь методикой расчета, описанной в [9], попытаться определить функцию распределения элементов матовой поверхности по направлениям, то окажется, что для одной и той же матовой поверхности функции

деления остается неизменной. Наблюдаемый «завал» обусловлен реально существующим завалом индикатрисы — перераспределением интенсивности в пользу прямого регулярного пучка. Такое перераспределение интенсивности является проявлением кооперативных эффектов и согласуется с результатами работы [10].

Появление и развитие регулярного пучка в потоке излучения, проходящем через шероховатую границу раздела, можно трактовать как проявление кооперативных эффектов. Полученные аналитические соотношения удовлетворительно согласуются с экспериментом, могут служить основой для оценки структуры микрорельефа шероховатой поверхности.

#### Литература

- [1] Г. М. Городинский. *Опт. и спектр.*, 15, 113, 1963.
- [2] А. С. Топорец. *Опт. и спектр.*, 16, 102, 1964.
- [3] А. С. Топорец. *Опт. и спектр.*, 24, 127, 1968.
- [4] К. Е. Тоггансе, Е. М. Спарроу, Р. С. Виркебак. *J. Opt. Soc. Am.*, 56, 916, 1966.
- [5] Н. А. Войшвилло. *Опт. и спектр.*, 22, 956, 1967.
- [6] В. К. Полянский, Л. В. Ковальский, Т. И. Миловидова. *Опт. и спектр.*, 25, 744, 1968.
- [7] В. К. Полянский. *Ж. прикл. спектр.*, 13, 1039, 1970.
- [8] Е. Янке, Ф. Эмде, Ф. Лёш. *Специальные функции*. Изд. «Мир», М., 1968.
- [9] А. А. Гершун, О. И. Попов. *Тр. ГОИ*, 24, 143, 1955.
- [10] М. В. Кабанов, Е. А. Ведерникова. *Тр. Межвуз. научного Совета по спектр. прозрачности атмосферы в видимой и ИК области спектра*. Томский госуниверситет, 153, 1968.

Поступило в Редакцию 20 мая 1970 г.