

## НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ОТРАЖЕНИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ОТ ШЕРОХОВАТЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

В.И. Олейник<sup>1</sup>, В.Н. Шмаров<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>НПО «Метрология», Харьков,

<sup>2</sup>Национальный авиационный университет, Киев)

*Экспериментально исследованы условия возникновения зеркального и диффузного рассеяния оптических волн от металлических поверхностей, обработанных различными абразивами. Исследованы физические механизмы возникновения зеркальной составляющей отраженных световых волн и изучено взаимодействие световых потоков при отражении от статистически шероховатых металлических поверхностей с крупным микрорельефом, размеры которого превышают длину волны зондирующего светового излучения.*

***зеркальное и диффузное рассеяние, металлические поверхности, зондирующее световое излучение, зеркальная составляющая***

**Введение.** В работах [1, 2] выполнены теоретические исследования особенностей рассеяния световых волн на шероховатой поверхности со статистически распределенными крупномасштабными неоднородностями, характерные размеры которых превышают длину волны падающего светового излучения. Эти исследования на приближенных моделях показывают, что отраженный от такой поверхности эхосигнал содержит зеркальную составляющую, а при определенных углах падения светового потока на такую поверхность преобладающей становится диффузная составляющие светового потока. Для практических целей диагностики шероховатости поверхностей представляет большой интерес исследовать условия появления зеркального отражения. Его появление при рассеянии света на шероховатых поверхностях указано в работе [3].

**Экспериментальные исследования эффектов рассеяния оптического излучения при его отражении от статистически шероховатой поверхности с крупномасштабными неоднородностями.** Возникновение зеркальной составляющей в отраженном световом потоке от статистически шероховатой поверхности с крупномасштабным рельефом в научной литературе трактуется неоднозначно. Наиболее фундаментальные результаты описаны в работах [3 – 6].

С одной стороны, зеркальная составляющая может формироваться в результате интерференционного сложения световых пучков, отраженных

от элементарных микро площадок. Такой зеркальный пик имеет поляризацию, которая соответствует формулам Френеля.

С другой стороны, возникшее в результате интерференции зеркальное отражение светового потока имеет дифракционную природу и состояние поляризации такого зеркального пика будет соответствовать падающему световому потоку. Дифракционные явления возникают при наклонном падении зондирующего излучения и формируются в результате дифракционного взаимодействия отраженных световых потоков от выступающих краев элементарных отражающих микро площадок. Эти отражающие края микро площадок можно представить в виде определенной совокупности непрозрачных экранов.

В тоже время можно утверждать, как следует из работы [7], что формирование зеркального пика объясняется этими двумя физическими механизмами и их влияния на возникновение зеркального пика обусловлено состоянием поляризации, падающего на статистически шероховатую поверхность излучения с крупномасштабным рельефом.

Нами были проведены модельные исследования условий, при которых на фоне диффузного рассеяния света при его отражении от шероховатой поверхности, имеющей высоту шероховатости  $h \succ \lambda$ , появляется зеркальная составляющая рассеянного света. При определении высоты неоднородности определялось среднее отклонение точек профиля от средней линии и средняя разность пяти высот наивысших и пяти наинизших точек на базовой длине профиля исследуемой поверхности.

В качестве объектов отражения использовались плоские металлические поверхности, обработанные наждачными порошками (абразивами) с различной крупностью М-5, М-14, М-20, № 100, № 180, № 240, № 320. Предварительно измерялись средние высоты неровностей на модельных шероховатых поверхностях, обработанными такими абразивами. Результаты этих измерений с использованием двойного и интерференционного микроскопов сведены в табл. 1.

Оценка интенсивности зеркальной составляющей рассеянного излучения при падении на шероховатую поверхность лазерного излучения проводилась на гониометрической установке с использованием гониометра типа ГС-5 и гелий-неонового лазера типа ЛГ-302, формирующего зондирующее исследуемую поверхность излучение, и в котором выделялась один тип поляризации.

Как следует из табл. 1, обработка металлической поверхности абразивами с точки зрения поставленной модельной задачи – получения большого значения отношения средней высоты микро неровностей к длине волны 0,632 мкм – целесообразна при использовании абразивов

№ 100, № 180, № 240, № 320. Применение абразивов № 180 и № 240 для этих целей дает одинаковые результаты.

Таблица 1

Результаты измерений средних высот неровностей

Наименование абразива, применяемого для обработки металлической поверхности	Пределы средней высоты микронеровностей $h$ (микрометрах)	Среднее значение отношения средней высоты микронеровностей $h$ к длине волны 0,632 мкм (округлено до целого значения)
М-5	около 1	меньше 2 ( $\approx 1,5$ )
М-14	1 – 1,5	2
М-20	1 – 1,3	2
№ 100	18 – 20	30
№ 180	8 – 10	14
№ 240	7 – 9	12
№ 320	4 – 5	7

В качестве приемника использовался ФЭУ-84, максимум спектральной чувствительности фото катода которого захватывает красную область спектра, включая  $\lambda = 0,632$  мкм.

Результаты измерений, фиксирующих возникновение зеркального и диффузного отражения при обработке поверхности абразивами № 240, М-14, М-5 и № 320, сведены в табл. 2.

При проведении исследований контролировался линейный режим фотоприемника путем использования дополнительных калиброванных нейтральных светофильтров типа НС с известным коэффициентом пропускания для ослабления зондирующего излучения. Для удобства анализа результаты измерений нормированы на величину  $10^{-6}$ .

Поскольку целью проведения измерений было исследование динамики развития зеркального отражения от различного рода шероховатых поверхностей (с параметром шероховатости  $h/\lambda$ ), то измерения проводились только в тех пространственно-угловых областях, которые характеризуются наличием зеркальной составляющей оптического отраженного от поверхности сигнала. Для остальных областей из-за отсутствия зеркального отражения зеркальный эхосигнал принимался равным нулю. Отсчет зеркального эхосигнала производился от величины сигнала диффузного отражения.

Следует помнить, что при угле зондирования поверхности равным (или близким)  $90^\circ$  интенсивность отраженного сигнала – зеркальное отражения – равна интенсивности зондирующего исследуемую поверхность сигнала с учетом коэффициента отражения  $\rho$  данной поверхности.

Таблица 2

Результаты измерений, фиксирующих возникновение зеркального и диффузного отражения при обработке поверхности абразивами № 240, М-14, М-5 и № 320

Угол падения (градусы – мин )	Нормированное относительное значение интенсивности зеркального отражения ( абразив №240 )	Нормированное относительное значение интенсивности зеркального отражения ( абразив №320 )	Нормированное относительное значение интенсивности зеркального отражения ( абразив М-14 )	Нормированное относительное значение интенсивности зеркального отражения ( абразив М-5 )
10°	0-диффузное отражение	0-диффузное отражение	0-диффузное отражение	0-диффузное отражение
20°	0-диффузное отражение	0-диффузное отражение	0-диффузное отражение	0-диффузное отражение
30°	0-диффузное отражение	0-диффузное отражение	0-диффузное отражение	0-диффузное отражение
40°	0-диффузное отражение	0-диффузное отражение	0-диффузное отражение	0-диффузное отражение
50°	0-диффузное отражение	0-диффузное отражение	0-диффузное отражение	0-диффузное отражение
60°	0-диффузное отражение	0-диффузное отражение	0-диффузное отражение	$3,62 \times 10^{-6}$
70°	0-диффузное отражение	0-диффузное отражение	$3,23 \times 10^{-6}$	$45 \times 10^{-6}$
80°	0-диффузное отражение	0-диффузное отражение	$23 \times 10^{-6}$	$120 \times 10^{-6}$
83°	0-диффузное отражение	$2,82 \times 10^{-6}$	$200 \times 10^{-6}$	$9000 \times 10^{-6}$
86°	$2,4 \times 10^{-6}$	$12 \times 10^{-6}$	$24300 \times 10^{-6}$	$31200 \times 10^{-6}$
86°30 <sup>1</sup>	$6,2 \times 10^{-6}$	$1080 \times 10^{-6}$	$29600 \times 10^{-6}$	$34400 \times 10^{-6}$
87°	$12,8 \times 10^{-6}$	$3640 \times 10^{-6}$	$32800 \times 10^{-6}$	$36200 \times 10^{-6}$
87°30 <sup>1</sup>	$18,8 \times 10^{-6}$	$6600 \times 10^{-6}$	$34440 \times 10^{-6}$	$36800 \times 10^{-6}$
87°45 <sup>1</sup>	$32 \times 10^{-6}$	$8920 \times 10^{-6}$	$35120 \times 10^{-6}$	$37600 \times 10^{-6}$
88°	$109 \times 10^{-6}$	$12000 \times 10^{-6}$	$36160 \times 10^{-6}$	$38000 \times 10^{-6}$

В начальной пространственно-угловой области процесс возникновения зеркальной составляющей отраженного от статистически шероховатой поверхности к крупными неоднородностями носит лавинообразный характер. Величина зеркальной составляющей  $\bar{I}_z$  в начальной пространственно-угловой области для всех исследованных типов поверхностей равна

$$\bar{I}_z = \rho \bar{I}_п. \quad (1)$$

Как видно из проведенных исследований, возникновение зеркального отражения в пространственно-угловых областях зависит от шероховатости поверхности и возникает при меньших углах падения зондирующего излучения на менее шероховатых поверхностях.

Интенсивность зеркального эхо сигнала и крутизна ее нарастания (спада) зависит от уровня шлифовки поверхности и чем она грубее, тем меньше интенсивность и больше крутизна нарастания (спада) зеркального эхо сигнала. В пространственно-угловой области, где наблюдается устойчивая динамика развития отраженного от поверхности зеркального сигнала, экспериментально полученные зависимости его интенсивности от угла падения  $\varphi$  зондирующего сигнала хорошо описывается выражением (с учетом погрешностей измерений):

$$\bar{I}_z = \rho \bar{I}_п \exp(-A_\lambda h^2 \cos^2 \varphi / \lambda^2), \quad (2)$$

где  $A_\lambda$  – коэффициент, зависящий от длины волны и угла  $\varphi_0$ , при котором начинает развиваться зеркальное отражение от шероховатой поверхности с высотой неровности  $h \gg \lambda$ . Как показано в работе [8],  $A_\lambda \approx 10$ .

Следует иметь ввиду, что коэффициент  $\rho$  учитывает не только отражение, но и рассеяние света от шероховатой поверхности.

Легко показать из уравнения (2), что зеркальная составляющая отраженного света от шероховатой поверхности при  $\varphi = 0$  начинает появляться на диффузном фоне при  $h \approx \lambda$  или

$$h \cos \varphi = \lambda. \quad (3)$$

Проведенные исследования показывают, что в данных условиях эксперимента зеркальная составляющая от статистически шероховатой поверхности с крупным рельефом формируется в результате интерференции дифрагированных световых волн. При этом выполняется условие: разность хода  $\Delta$  этих световых пучков равна целому числу длин волн. При выполнении условия (3):

$$\Delta = 2h \cos \varphi = 2\lambda. \quad (4)$$

Уравнение (4) описывает условие появления зеркальной составляющей света при отражении его от шероховатой поверхности. Это условие не противоречит критерию Рэлея [9], которое распространяется на определение разности хода световых пучков, равного  $\lambda/4$ , при оценке допустимой аберации после отражения света от полированной отражающей поверхности.

В табл. 3 по результатам измерений с учетом уравнения (3) приведены средние значения полуширин максимумов интенсивности зеркальных пиков в зависимости от качества обработки поверхности различными абразивами (1 – угол падения; 2, 4, 6, 8 – нормированное относительное значение максимума интенсивности ( $\times 10^{-6}$ ) зеркального отражения (абразивы №240, №320, соответственно); 3, 5, 7, 9 – среднее значение полуширины максимума интенсивности зеркального отражения (абразив № 240, № 320, М-14 и М-5 соответственно).

Из результатов проведенных исследования видно, что с улучшением качества обработки поверхности интенсивность зеркальной составляющей на фоне диффузного отражения сильно растет, а полуширина ее максимального пика в угловых величинах уменьшается.

Попытаемся объяснить это с физической точки зрения.

На шероховатых поверхностях с крупномасштабными неоднородностями имеется множество отражающих микро площадок, для которых могут одновременно выполняются условия :

$$h \gg \lambda ; h \gg \lambda \text{ и } h \approx \lambda . \quad (5)$$

Естественно предположить, что нормали к этим микро площадкам лежат вблизи некоторого угла. Если считать в первом приближении, что отражение от них описывается законами Френеля, то отраженный световой поток будет пропорционален косинусу этого угла и обратно пропорционален освещенной площади при падении света по нормали .

С уменьшением  $h$  уменьшается в среднем отражающая поверхность микро площадок из-за их пространственно-углового выравнивания, что приводит к росту зеркальной составляющей отраженного света. Вместе с тем, с уменьшением угла падения узко направленного света освещаемая площадь увеличивается, что приводит к уменьшению отраженного сигнала.

Таким образом, при отсутствии затенения полученные результаты описываются законами геометрической оптики. При малых углах падения зеркальный максимум приближается к диффузионному уровню рассеяния.

Следует отметить, что на полуширину отраженного максимума влияют угловая расходимость падающего пучка света, угловое распределение нормалей к микро площадкам и углы дифракции для микро площадок с малыми размерами.

Угловое распределение нормалей к микро площадкам можно оценить, используя методику, которая описана в работе [10].

Согласно этой методике может быть измерена функция распределения микро площадок по углам наклона к макро поверхности, обработанной примерно такими же абразивами, которые мы использовали.

Таблица 3

Средние значения полуширин максимумов интенсивности зеркальных пиков

1	2	3	4	5	6	7	8	9
10°	0-диффузное отражение	Зеркальный пик отсутствует	0-диффузное отражение	Зеркальный пик отсутствует	0-диффузное отражение	Зеркальный пик отсутствует	0-диффузное отражение	Зеркальный пик отсутствует
20°	0-диффузное отражение	Зеркальный пик отсутствует	0-диффузное отражение	Зеркальный пик отсутствует	0-диффузное отражение	Зеркальный пик отсутствует	0-диффузное отражение	Зеркальный пик отсутствует
30°	0-диффузное отражение	Зеркальный пик отсутствует	0-диффузное отражение	Зеркальный пик отсутствует	0-диффузное отражение	Зеркальный пик отсутствует	0-диффузное отражение	Зеркальный пик отсутствует
40°	0-диффузное отражение	Зеркальный пик отсутствует	0-диффузное отражение	Зеркальный пик отсутствует	0-диффузное отражение	Зеркальный пик отсутствует	0-диффузное отражение	Зеркальный пик отсутствует
50°	0-диффузное отражение	Зеркальный пик отсутствует	0-диффузное отражение	Зеркальный пик отсутствует	0-диффузное отражение	Зеркальный пик отсутствует	0-диффузное отражение	Зеркальный пик отсутствует
60°	0-диффузное отражение	Зеркальный пик отсутствует	0-диффузное отражение	Зеркальный пик отсутствует	0-диффузное отражение	Зеркальный пик отсутствует	3,62	2°54 <sup>1</sup>
70°	0-диффузное отражение	Зеркальный пик отсутствует	0-диффузное отражение	Зеркальный пик отсутствует	3,23	3°55 <sup>1</sup>	45	2°32 <sup>1</sup>
80°	0-диффузное отражение	Зеркальный пик отсутствует	0-диффузное отражение	Зеркальный пик отсутствует	23	3°16 <sup>1</sup>	120	2°12 <sup>1</sup>
83°	0-диффузное отражение	Зеркальный пик отсутствует	2,82	4°26 <sup>1</sup>	200	2°46 <sup>1</sup>	9000	1°22 <sup>1</sup>
86°	2,4	4°48 <sup>1</sup>	12	3°56 <sup>1</sup>	24300	1°58 <sup>1</sup>	31200	1°12 <sup>1</sup>
86°30 <sup>1</sup>	6,2	4°26 <sup>1</sup>	1080	3°34 <sup>1</sup>	29600	1°44 <sup>1</sup>	34400	54 <sup>1</sup>
87°	12,8	3°46 <sup>1</sup>	3640	2°54 <sup>1</sup>	32800	1°32 <sup>1</sup>	36200	42 <sup>1</sup>
87°30 <sup>1</sup>	18,8	3°16 <sup>1</sup>	6600	2°24 <sup>1</sup>	34440	54 <sup>1</sup>	36800	34 <sup>1</sup>
87°45 <sup>1</sup>	32	2°36 <sup>1</sup>	8920	1°54 <sup>1</sup>	35120	48 <sup>1</sup>	37600	32 <sup>1</sup>
88°	109	1°56 <sup>1</sup>	12000	1°24 <sup>1</sup>	36160	42 <sup>1</sup>	38000	30 <sup>1</sup>

Эта функция имеет острый резонансный характер с угловой шириной пика на уровне 0,5 примерно 15 – 20 угловых минут. При больших углах функция распределения круто падает и уже на уровне 0,1 – 0,2 ее угловая ширина достигает значений около 70° – 80°.

Как следует из результатов измерений, представленных в табл. 3, чем грубее обработана поверхность, тем больше полуширина отраженного максимума и явление диффузного рассеяния возникает при больших углах.

Дифракционные явления сглаживают кривую распределения. Для каждой микроплощадки угол дифракции равен угловой ширине нулевого дифракционного максимума или угловому расстоянию между первыми минимумами. Очевидно, максимумы более высоких порядков дифракции можно не учитывать, так как в них сосредоточено значительно меньше световой энергии. С ростом угла падения растет “эффективная” площадь микро площадок и явления дифракции уже преобладают в формировании отраженного светового сигнала.

Следовательно, с увеличением угла падения полуширина зеркального пика будет увеличиваться.

Полученные результаты определения характеристик зеркального и диффузного пиков могут быть использованы для диагностики шероховатых поверхностей путем использования методики контроля параметров шероховатости поверхности, в основу которой может быть положена методика, описанная в работах [11, 12]. При этом предполагается, что профиль шероховатой поверхности можно описать с использованием среднеквадратичного отклонения шероховатостей  $\sqrt{\langle \delta^2 \rangle}$  и корреляционной функции  $K(r)$ , которая характеризует распределение шероховатостей по исследуемой поверхности. Такое предположение справедливо, если распределение высот задается гауссовой функцией и выполняются условия:

$$\sqrt{\langle \delta^2 \rangle} \ll T \quad \text{и} \quad \sqrt{\langle \delta^2 \rangle} \ll \lambda, \quad (6)$$

где  $T$  – интервал корреляции .

**Заключение.** Полученные результаты экспериментальных исследований показывают, что при отражении оптического излучения от статистически шероховатой поверхности могут формироваться как френелевское отражение, так и дифракционно-интерференционное. Дано объяснение физических механизмов формирования типа отражения. Показано, что тип отражения зависит от угла падения зондирующего излучения и от высоты неровностей по отношению к длине волны падающего опти-



ческого излучения на статистически шероховатую поверхность. Разработанная методика определения зеркальной составляющей отраженного оптического потока позволяет оценить качество технологической обработки такой поверхности. Произведена оценка диапазона углов зондирования шероховатой поверхности, при которых обеспечивается диффузное рассеяние отраженного светового потока от статистически шероховатой поверхности с крупномасштабными неоднородностями. Выполненные исследования позволяют оптимизировать пространственно-угловую ориентацию приемников оптического излучения, которые принимают отраженный сигнал от различного типа рассеивающих поверхностей, с учетом наличия в отраженном световом потоке зеркального пика и диффузной составляющей.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Исакович М.А. Рассеяние световых волн // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 1952. – Т. 23, вып. 3 (9). – С. 305 – 342.
2. Ornstein L., Berg R. Light leakage // Physica. – 1937. – № 4. – P. 1181 – 1185.
3. Гершун А.А., Попов О.И. Отраженный световой поток // Труды ГОИ. – 1955. – Т. 24, вып. 143. – С. 3 – 7.
4. Иванов А.П., Топорец А.С. Зеркальная составляющая в отраженном световом потоке // Журнал технической физики. – 1956. – Т. 26, № 4. – С. 623 – 631.
5. Иванов А.П., Топорец А.С. Исследование отраженного потока // Журнал технической физики. – 1956. – Т. 26, № 34. – С. 631 – 640.
6. Городинский Г.М. // Оптика и спектроскопия. – 1963. – Т. 15, № 2. – С. 113 – 121.
7. Поль Р.В. Оптика и атомная физика. – М.: Наука, 1966. – 365 с.
8. Топорец А.С. Расчет интенсивности зеркального эхосигнала // Оптика и спектроскопия. – 1964. – Т. 26, вып. 1. – С. 102 – 109.
9. Рэлей Д. Теория звука. – М.: ГИИТ, 1944. – 367 с.
10. Иванов А.П., Топорец А.С. Угловое распределение нормалей к микроплощадкам // Журнал технической физики. – 1956. – Т. 26, № 2. – С. 631 – 642.
11. Архангельский О.В., Максимяк П.П. Контроль параметров шероховатости поверхности // Оптика и спектроскопия. – 1989. – Т. 70, вып. 70. – С. 887 – 896.
12. Шмаров В.М. Сучасні інформаційні та енергозберігаючі технології життєзабезпечення людини // Зб. наук. праць. – К.: ФАДА-ЛТД. – 1999. – Вип. № 6. – С. 486 – 489.

Поступила 7.02.2005

**Рецензент:** доктор технических наук профессор В.И. Карпенко,  
Харьковский университет Воздушных Сил.