

УДК 535.39:535.5

В.Н. ШМАРОВ*Укрспецэкспорт, Украина*

ОЦЕНКА МАТРИЧНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЗЕРКАЛЬНОГО ОТРАЖЕНИЯ ПОЛЯРИЗОВАННОГО СВЕТА ОТ ШЕРОХОВАТОЙ ПОВЕРХНОСТИ И ЕЕ ОТРАЖАТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ ПРИ ЗАЩИТНОМ ПОКРЫТИИ

Выполнены экспериментальные исследования по деполяризации лазерного излучения, падающего на шероховатую поверхность с крупномасштабными неоднородностями. Произведена на основе выполненных исследований оценка матричных параметров зеркального отражения светового потока. Выяснена физическая природа рождения зеркального отражения светового потока от шероховатой поверхности. Определены зависимости коэффициента отражения зеркальной составляющей отраженного светового потока от угла падения зондирующего излучения и исследованы отражающие способности шероховатой поверхности в зависимости от типа защитного покрытия таких поверхностей.

деполяризация лазерного излучения, световой поток, защитное покрытие

Введение

Многие промышленные крупногабаритные изделия (детали, узлы), к которым предъявляются высокие требования к технологической точности при изготовлении (винты, крылья, фюзеляжные узлы и т.д.) и изготавливаются на предприятиях авиационного машиностроения, транспортного машиностроения и судостроения, с физической точки зрения представляют собой шероховатые поверхности с крупномасштабными неоднородностями. Достичь высокой технологической точности при их изготовлении в ограниченном диапазоне измерения углов и линейных базисов удастся при использовании координатных машин стационарного типа [1] и специальных базисно-угломерных средств измерений [2].

Однако в условиях проведения ремонтно-восстановительных работ на объектах эксплуатации или при отсутствии стационарных вышеуказанных средств измерений, а также для проведения измерений линейных базисов в диапазоне, превышающем несколько метров, обеспечить высокую технологическую точность традиционными оптико-механическими методами не представляется возможным.

Решить поставленную задачу в таких условиях производства и достичь низких погрешностей измерений формы и линейно-угловых параметров про-

мышленных крупногабаритных изделий можно лишь при использовании дистанционных средств измерений линейных и угловых величин, которые функционально основаны на использовании лазерных источников зондирования [3 – 5].

Высота поверхностных неоднородностей таких крупногабаритных изделий обычно значительно превышает длину волны излучения лазерных источников, зондирующих эти поверхности. Такие неоднородности есть ни что иное, как набор микроплощадок со статистическим распределением пространственно-угловых параметров [6].

Методика фиксации зеркальной составляющей, формируемой на фоне диффузионного отражения в обратном эхо сигнале при зондировании такой шероховатой поверхности поляризованным лазерным излучением, во многих случаях влияет на функциональную структуру оптической приемной системы, а также на выбор и оптимизацию режимов приема и обработки эхо сигнала. В работе на основе выполненных экспериментальных исследований произведена оценка матричных параметров зеркального отражения светового потока, отраженного от шероховатой поверхности с крупномасштабными неровностями.

Экспериментальное определение матричных параметров зеркальной составляющей светового потока в отраженном сигнале при зондировании поверх-

ности поляризованным излучением и оценка отражательной способности поверхности при ее защитном технологическом покрытии.

Френелевские амплитудные коэффициенты отражения поляризованного света от поверхности выражаются через модули коэффициентов отражения для двух направлений поляризации [7]:

- для р-поляризации ($\parallel$) $R_p = |R_p| \exp(i\alpha_p)$;
- для s-поляризации ($\perp$) $R_s = |R_s| \exp(i\alpha_s)$. (1)

Для отраженного потока матрицу преобразования вектора Стокса можно представить в виде [8]:

$$\begin{pmatrix} 1 & f_{12} & 0 & 0 \\ f_{21} & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & f_{33} & f_{34} \\ 0 & 0 & f_{43} & f_{44} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

$$\begin{aligned} f_{21} &= -\cos 2\rho; \quad f_{33} = f_{44} = \sin 2\rho \cos \Delta; \\ f_{34} &= f_{44} = \sin 2\rho \sin \Delta; \\ \text{где } \alpha &= \alpha_p - \alpha_s; \quad \Delta = \Delta_p - \Delta_s; \\ \text{tg } \rho &= |R_p|/|R_s|. \end{aligned} \quad (3)$$

В экспериментах использовались поверхности, обработанные крупнозернистыми абразивами № 240 и 320, благодаря чему создаются крупномасштабные неровности. Для параметров измерений, представленных в (2) и (3), измерялись интенсивности зеркального отражения для р-поляризации и s-поляризации при облучении поверхности поляризованным лазерным излучением.

Результаты исследований, представленные в табл. 1, показывают, что деполяризация лазерного пучка при отражении от шероховатой поверхности уменьшается с увеличением угла падения. Это означает, что матрица отражения от шероховатой поверхности из физических соображений не должна значительно отличаться от матрицы отражения от изотропной границе раздела двух сред. При этом должно выполняться условие

$$f_{12}^2 + f_{33}^2 + f_{34}^2 \approx 1, \quad (4)$$

а угол зеркального отражения близок к 90° .

При таком приближении для шероховатых поверхностей с крупномасштабными неоднородностями

ми, для которых высота неоднородностей значительно больше длины волны падающего на исследуемую поверхность лазерного излучения, в первом приближении можно считать, что [9]:

$$\Delta_p = \alpha_p + \arctg \frac{|R_p| \frac{\lambda}{\pi h} + |R_s| \frac{\lambda^2}{\pi^2 h^2}}{|R_p| + |R_s| \frac{\lambda}{\pi h}}; \quad (5)$$

$$\Delta_s = \alpha_s + \arctg \frac{|R_p| \frac{\lambda}{\pi h} - |R_s| \frac{\lambda^2}{\pi^2 h^2}}{|R_p| + |R_s| \frac{\lambda}{\pi h}}. \quad (6)$$

Анализ выражений (5) и (6) показывает, что для шероховатых поверхностей с крупномасштабными неоднородностями эллипсометрические параметры отраженного зеркального потока не в полной мере соответствуют законам Френеля и Снеллиуса. Фактически это означает, что возникают эффекты перекрытия световых пучков с разной ориентацией в направлении зеркального отражения.

Анализ теоретических исследований, изложенных в [10], показал, что при зондировании шероховатой поверхности с крупномасштабными неоднородностями поляризация отраженного света нарушается, т.е. отраженный поток света деполяризуется.

Приведенные экспериментальные исследования в данной работе подтверждают это.

Такое явление с физической точки зрения нельзя корректным образом объяснить с использованием представлений лучевой оптики. Вместе с тем можно найти достаточно убедительные с физической точки зрения доказательства вышеизложенной математической модели рассеяния поляризованного света при его отражении от шероховатой поверхности с крупномасштабными неоднородностями, используя следующие обстоятельства.

Электрические векторы электромагнитного поля (падающего света) при многократном отражении лучей от шероховатой поверхности с крупномасштабными неоднородностями колеблются в разных плоскостях. Интенсивность лучевого потока при отражении мала по отношению к падающему потоку света, а отраженное излучение деполяризовано. Эти

явления объясняются дифракционными явлениями на краях микроплощадок, описанными в [11].

Эти микроплощадки и создают рассеивающую поверхность. Угловое распределение интенсивности рассеянного излучения и степень его деполяризации разные для поверхностей микроплощадок, имеющих одинаковую функцию распределения по углам, но разную – по размерам площадок. Лазерное излучение, зондирующее такую поверхность, представляет собой монохроматическое излучения, имеющее определенное угловое распределение интенсивности (мощности), в том числе при малой его расходимости такой световой пучок можно считать параллельным.

Все элементарные лучи, отраженные одной площадкой, – когерентны, а весь рассеянный световой поток от поверхности со статистическим распределением микроплощадок – некогерентен.

Ограниченной в пространственно-угловой области отраженный световой пучок из-за явлений дифракции оказывается размытым. Если для упрощения учитывать только дифракционные пучки нулевого порядка, то отраженный и рассеянный световой поток лежит внутри некоторого конуса рассеяния. Ось такого конуса рассеяния направлена в сторону зеркальной составляющей отраженного света.

Выделим для наглядности физической интерпретации на отражающей поверхности некоторое множество площадок с одинаковыми размерами. Эти площадки при формировании отраженного рассеянного света образуют дифракционное световое поле в направлении наблюдения. Дифракционные максимумы интенсивности такого поля лежат внутри конуса рассеяния. Такой конус рассеяния можно сопоставить с эффективным конусом нормалей, оптимальным образом связанного с пространственно-ориентированными микроплощадками.

Следовательно, можно считать, что рассеяние в направлении наблюдения формируется тем ансамблем микроплощадок, для которых нормали лежат внутри эффективного конуса рассеяния и который оптимальным образом ориентирован с направлени-

ем наблюдения. Очевидно, что микроплощадки могут различаться формой их контура и размерами. Будем считать, что размеры микроплощадки значительно больше длины волны зондирующего поверхность излучения и поэтому можно ввести понятие для статистически распределенных микроплощадок – среднее значение их размеров. В этом случае форму статистически усредненного контура можно считать произвольной. С изменением формы такого контура изменяются параметра конуса дифракционного рассеяния, что приводит к изменению пределов интегрирования (суммирования). При интегрировании учитывается функция распределения микроплощадок по их ориентированию в пространстве и зависимость коэффициента отражения от их ориентации. Такой физический подход существенно упрощает трактовку полученных результатов, не ограничивая общности.

Как показали выполненные исследования, коэффициент отражения при малых углах падения слабо зависит от шероховатости поверхности, если не учитывать эффекты затенения. При углах падения в пределах до 60° коэффициент отражения незначительно увеличивается, при углах более 65° коэффициент отражения резко возрастает, достигая значения около 6,5% для гладких поверхностей и 4 – 4,5% для неровных поверхностей. Металлические поверхности могут пропускать или поглощать свет только на тонких пленках [12]. Поэтому в рамках данной работы металлические поверхности следует рассматривать только как отражающие.

Проведены исследования отражающих фотометрических свойств некоторых типов металлов на спектрофотометре типа ФМ-85. Результаты исследований для видимого и инфракрасного области спектра представлены в табл. 2. Методика измерений использовалась из работы [13]. Из представленной в таблице данных видно, что металлы являются весьма селективными материалами. Минимальную селективную избирательность имеет алюминий. Коэффициент диффузного отражения для всех исследованных металлов растет в сторону длинноволнового диапазона оптического спектра.

Таблица 1

Результаты экспериментов с использованием абразивов № 240 и 320

Угол падения (град. – мин.)	Нормированное значение интенсивности (*10 ⁻⁶) зеркального отражения для р-поляризации (абразив № 240)	Нормированное значение интенсивности (*10 ⁻⁶) зеркального отражения для s-поляризации (абразив № 240)	Отношение интенсивности зеркального отражения р-поляризации к зеркальному отражению s-поляризации ρ (абразив № 240)	Нормированное значение интенсивности (*10 ⁻⁶) зеркального отражения для р-поляризации (абразив № 320)	Нормированное значение интенсивности (*10 ⁻⁶) зеркального отражения для s-поляризации (абразив № 320)	Отношение интенсивности зеркального отражения р-поляризации к зеркальному отражению s-поляризации ρ (абразив № 320)
10°	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
30°	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
50°	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
70°	0-диффузное отражение	Зеркальный пик отсутствует	0-диффузное отражение	Зеркальный пик отсутствует	0-диффузное отражение	0-диффузное отражение
80°	0-диффузное отражение	Зеркальный пик отсутствует	0-диффузное отражение	Зеркальный пик отсутствует	0-диффузное отражение	0-диффузное отражение
83°	0-диффузное отражение	Зеркальный пик отсутствует	0-диффузное отражение	2,62	2,82	0,95
86°	2,2	2,4	0,92	9,8	12	0,82
86°30 ¹	4,2	6,2	0,68	700	1080	0,65
87°	5,8	12,8	0,45	1565	3640	0,43
87°30 ¹	7,7	18,8	0,41	2640	6600	0,40
87°45 ¹	11	32	0,34	2855	8920	0,32
88°	34	109	0,31	3600	12000	0,30

Таблица 2

Результаты исследований отражающих фотометрических свойств металлов на спектрофотометре типа ФМ-85

Тип металла (плоские пластины)	Коэффициент отражения на длине волны 0,5 мкм	Коэффициент отражения на длине волны 0,6 мкм	Коэффициент отражения на длине волны 0,8 мкм	Коэффициент отражения на длине волны 2,0 мкм	Коэффициент отражения на длине волны 2, 5 мкм
Бронза (70% Cu и 30% Sn)	0,6	0,65	0,76	0,8	0,83
медь	0,4	0,74	0,85	0,93	0,96
железо	0,48	0,57	0,68	0,75	0,81
алюминий	0,85	0,85	0,86	0,86	0,87
никель	0,58	0,66	0,70	0,84	0,88

В производственных условиях часто для защиты от атмосферных воздействий покрывают защитными материалами или обрабатывают по специальным технологиям рабочие металлические поверхности. Исследовались металлические пластины из алюминия после специальной обработки. Результаты представлены в табл. 3.

Таблица 3
Результаты специальной обработки

Способ или характер защиты металла	Наименование металла	Коэффициент отражения металла до защиты по длине волны 0,6 мкм	Коэффициент отражения металла после защиты на длине 0,6 мкм
Лак УВЛ-3	железо	0,57	0,51
	медь	0,74	0,68
	алюминий	0,85	0,79
Анодирование	алюминий	0,85	0,82

Следовательно, защитное покрытие приводит к уменьшению коэффициента отражения в пределах на 7 – 10% – для разного типа покрытий и материалов; анодирование алюминия снижает его коэффициент отражения в видимой области спектра всего на 3 – 4%.

Заключение

Выполненные экспериментальные исследования показали, что поляризованное лазерное излучение при отражении от шероховатой поверхности с крупномасштабными неоднородностями деполяризуется. В отраженном световом потоке присутствует как диффузная составляющая, так и зеркальная составляющая. Интенсивность зеркальной составляющей зависит от угла падения зондирующего излучения.

Из выполненных исследований следует, что без учета эффектов затенения коэффициент отражения при малых углах падения слабо зависит от шероховатости поверхности. С ростом угла падения коэффициент отражения возрастает, достигая максимального значения при углах падения больше 65°. При этом для гладких поверхностей максимальное значение коэффициента отражения несколько выше, чем для шероховатых поверхностей. А защитные покрытия приводят к уменьшению коэффици-

ента отражения зондирующего излучения, падающего на шероховатую поверхность с крупномасштабными неоднородностями.

Литература

1. Гапшис В.А. Координатные измерительные машины. – М.: Машиностроение, 1988. – 352 с.
2. Оптический производственный контроль / Под ред. Д. Малакары. – М.: Машиностроение, 1985. – 400 с.
3. Аблеков В.К., Колядин С.А., Фролов А.Ф. Высокора разрешающие оптические системы. – М.: Машиностроение, 1985. – 244 с.
4. Вагнер Е.Т., Митрофанов А.А., Барков В.Н. Лазерные и оптические методы контроля в самолетостроении. – М.: Машиностроение, 1977. – 176 с.
5. Коронкевич В.П., Ленкова Г.А. // Автометрия. – 1972. – № 6. – С. 68.
6. Хусу А.П., Витенберг Ю.Р., Пальмов В.А. Шероховатость поверхностей. – М.: Наука, 1975. – 385 с.
7. Аззам М., Башура Н. Эллипсометрия и поляризованный свет. – М.: Мир, 1981. – 325 с.
8. Джеррард Дж.М. Введение в матричную оптику. – М.: Мир, 1978. – 341 с.
9. Соколов Д.В. Оптические свойства металлов. – М.: Мир, 1961. – 170 с.
10. Шерклифф У. Поляризованный свет. – М.: Мир, 1965. – 235 с.
11. Полянский В.К., Рвачев В.П. // Оптика и спектроскопия. – 1967. – Т. 22, № 3. – С. 279.
12. Воронов С.А., Жижин Г.Н., Яковлев В.А. // I Всесоюзная конференция «Диагностика поверхностей: Тез. докл. – Каунас, 1986. – С. 16.
13. Шмаров В.М. Сучасні інформаційні та енергозберігаючі технології життєзабезпечення людини // 36. наук. праць. – К.: Фада-ЛТД. – 1999. – Вип. 5. – С. 5.

Поступила в редакцию 1.06.2004

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.И. Карпенко, Харьковский военный университет, Харьков.