

## **Рассеяние оптического излучения в лазерном гироскопе поверхностью зеркал с наноразмерной шероховатостью**

*Путем компьютерной обработки АСМ-сканов установлена корреляция между параметрами рассеяния подложек и отражающей поверхности зеркал лазерных гироскопов. Методика и разработанное программное обеспечение дают возможность выделять подложки с крупноразмерными выступами и неровностями, требующие дополнительной обработки от загрязнений, что увеличивает технологический выход зеркал, удовлетворяющих техническим требованиям.*

**Ключевые слова:** атомно-силовая микроскопия, лазерный гироскоп, зеркало, параметры рассеяния

Лазерные гироскопы, применяемые в системах инерциальной навигации для измерения угловой скорости, основаны на эффекте Саньяка – появлении фазового сдвига  $\psi$  у встречных световых волн во вращающемся кольцевом интерферометре [1]. В системе обычно используются три гироскопа – для измерения скорости вращения вокруг трех ортогональных осей. В состав лазерного гироскопа ЛГ-1 входит оптический резонатор, который образован четырьмя зеркалами, располагаемыми в вершинах квадрата с длиной стороны. В режиме генерации вдоль периметра резонатора в противоположных направлениях распространяются два световых луча. Вращение гироскопа с угловой скоростью  $\omega$  вокруг оси, перпендикулярной плоскости резонатора, изменяет разность частот встречных волн.

Для формирования выходного сигнала одно из зеркал делают полупрозрачным и часть световых потоков через смесительную призму поступает на регистрирующий элемент – двухсекционный фотодиод. Призма формирует на поверхности фотодиода интерференционные полосы. Если кольцевой лазер не вращается, интерференционная картина стационарна. Вращение приводит к перемещению интерференционных полос относительно приемных отверстий фотодиода и к колебаниям фототоков секций. Приемные отверстия секций фотодиодов расположены друг от друга на расстоянии, равном четверти интерференционной полосы. Вследствие этого сигналы, формируемые секциями фотодиода, имеют вид:

$$I_c = I_0(1 + \cos \psi), \quad (2)$$

$$I_s = I_0 \left( 1 + \cos \left( \psi - \frac{\pi}{2} \right) \right) = I_0(1 + \sin \psi). \quad (3)$$

В зависимости от знака проекции угловой скорости разность фаз  $\psi$  растет или уменьшается, что позволяет, сравнивая сигналы (2) и (3), определять направление вращения. Количество интерференционных полос  $N$ , переместившихся мимо приемного отверстия фотодиода за фиксированный промежуток времени, определяется угловой скоростью вращения лазера. При изменении угловой скорости изменяется  $N$ . Тогда угол  $\alpha$ , на который повернется за это время кольцевой лазер, связан с  $N$  соотношением:

$$\alpha = 360N\lambda, \quad (4)$$

где  $\lambda$  – длина волны квантов света.

Подсчет количества полос  $N$  производится преобразованием выходного сигнала в последовательность импульсов.

Рассеяние лазерного излучения на шероховатой поверхности зеркал в направлении встречного лазерного пучка приводит к связи встречных волн, к погрешностям в измерении угловой скорости и уменьшению порога чувствительности лазерного гироскопа[2]. К качеству поверхности зеркал предъявляются повышенные требования: доля излучения, рассеянного зеркалом, не должна превышать  $30\text{ppm}$  ( $1\text{ppm}=10^{-6}$ ). В свою очередь качество зеркал определяется состоянием подложек, на которые наносится отражающее покрытие[3].

Целью работы является установление корреляции между рассеивающими свойствами зеркал и подложек с тем, чтобы на стадии изготовления подложек произвести их отбраковку и увеличить выход зеркал, удовлетворяющих техническим требованиям.

Шероховатость сверхгладких поверхностей подложек и зеркал находится в нанометровом диапазоне. Адекватным средством исследования таких поверхностей является атомно-силовой микроскоп (АСМ). В работе использовался атомно-силовой сканирующий зондовый микроскоп Solver Pro. Размер зеркала  $1\times 1\text{мм}$ , а размер сканирующего участка  $30\times 30\text{мкм}$ . Поэтому при приемлемом времени измерений сканирование проводилось в семи точках равностороннего треугольника (рис.1). Длина стороны большого треугольника –  $0,56\text{мм}$ . Число точек измерений высоты в пределах скана  $512\times 512$ .

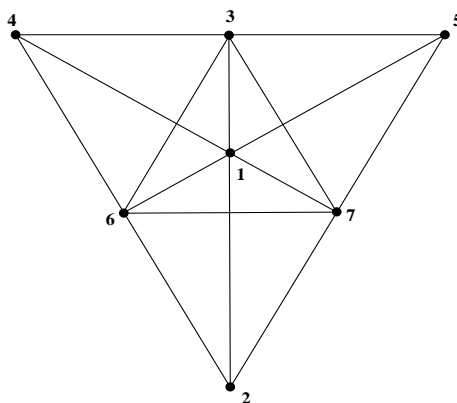


Рис.1.

Изображения, полученные с помощью АСМ, как правило, имеют две особенности. Во-первых, это общий наклон поверхности скана относительно базовой плоскости, что, прежде всего, является следствием неточной установки образца относительно зонда. Во-вторых, изображение представляет собой поверхность, близкую по форме к поверхности второго порядка, что, в основном, связано с перемещением пьезосканера по криволинейной траектории. Эти артефакты приводят к тому, что на изображение поверхности тратится большой объем пространства скана, а мелкие детали изображения становятся не видимы. Для устранения этих недостатков математическими методами проводится предварительная фильтрация изображения путем поворота плоскости изображения и вычитания поверхности второго порядка.

Для описания рассеивающих свойств подложек и зеркал используются три параметра:

### среднеквадратичная шероховатость

$$S_q = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{K=0}^{M-1} \sum_{l=0}^{N-1} [z(x_K, y_l) - m]^2},$$

где  $m = \frac{1}{MN} \sum_{K=0}^{M-1} \sum_{l=0}^{N-1} z(x_K, y_l)$  – среднее арифметическое MN измерений; **полное**

**интегральное рассеивание**, равное отношению мощности рассеяния к мощности излучения, падающего на поверхность; **амплитудный коэффициент обратного рассеивания**, равный отношению модуля комплексной амплитуды волны, рассеянной навстречу падающему лучу, к модулю комплексной амплитуды падающей волны. Методика расчета углового распределения интенсивности рассеянного излучения основана на векторной теории рассеяния плоской монохроматической волны, падающей под углом на шероховатую поверхность диэлектрика [3].

Всего статистической обработке было подвергнуто около 100 ситалловых подложек и зеркал. В таблицах приведены результаты исследования десяти из них. На изображении поверхности обычно имеются отдельные выступы и макронеровности, которые, как правило, связаны с загрязнением поверхности и удаляются после химической очистки. Поэтому была введена математическая операция выделения этих элементов с использованием вельвет-преобразований и расчет параметров рассеяния проводился отдельно для выступов и макронеровностей и отдельно для остаточной шероховатости. На рис.2 приведено изображение поверхности с выступами порядка сотен нм, а на рис.3 – изображение остаточной шероховатости высотой в единицы нм после фильтрации выступов.

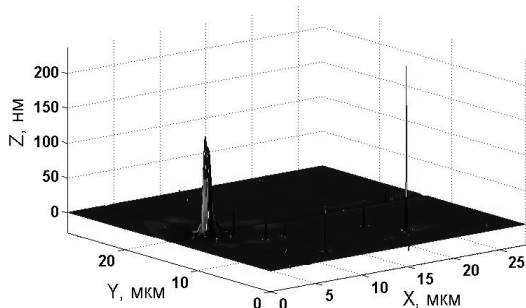


Рис.2.

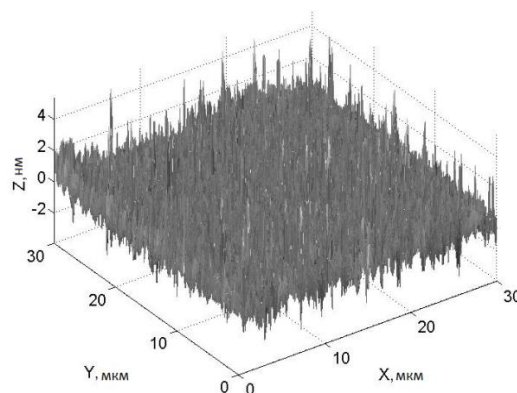


Рис.3.

Результаты компьютерной обработки сканов для десяти подложек и изготовленных на их основе зеркал приведены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1

№ подложки	Полное интегральное рассеяние, ppm	Макронеровности и выступы			Остаточная шероховатость		
		Интегральное рассеяние, ppm	Обратное рассеяние *10 <sup>6</sup>	Среднеквадратичная шероховатость, нм	Интегральное рассеяние, ppm	Обратное рассеяние *10 <sup>6</sup>	Среднеквадратичная шероховатость, нм
43	119	38	1.35	0.51	81	2.6	0.74
44	37	23	0.99	0.39	14	1.39	0.38
45	74	26	1.27	0.43	48	2.88	0.8
46	48	28	1.79	0.45	20	1.92	0.45
48	19	12	0.58	0.24	7	0.96	0.3
50	44	11	0.23	0.20	33	1.7	0.48
53	14	9	0.53	0.24	5	0.11	0.25
54	44	14	0.40	0.28	30	1.68	0.45
55	23	17	0.51	0.28	6	0.87	0.26
61	18	6	0.21	0.18	12	1.08	0.28

Таблица 2

№ подложки	Полное интегральное рассеяние, ppm		Макронеровности и выступы			Остаточная шероховатость		
	Расчет	Эксперимент	Интегральное рассеяние, ppm	Обратное рассеяние *10 <sup>6</sup> , ppm	Среднеквадратичная шероховатость, нм	Интегральное рассеяние, ppm	Обратное рассеяние *10 <sup>6</sup> , ppm	Среднеквадратичная шероховатость, нм
43	113	71	62	0.472	0.536	51	1.68	0.51
44	24	33	13	0.238	0.261	11	1.1	0.36
45	32	40	6	0.021	0.167	26	1.56	0.47
46	40	13	28	0.91	0.369	12	1.15	0.42
48	26	15	17	0.066	0.214	9	1.02	0.33
50	50	56	13	0.009	0.207	37	1.94	0.54
53	21	17	14	0.018	0.207	7	1.33	0.26
54	80	61	39	1.61	0.494	41	1.95	0.56
55	36	18	31	0.942	0.421	5	0.87	0.23
61	25	22	14	0.456	0.343	11	1.01	0.29

По техническим условиям качество зеркал оценивается параметром полного интегрального рассеяния (ПИР), который не должен превышать величины 30ppm. Этому условию удовлетворяют подложки №48,53,55,61 (таблица 1). Условию интегральное рассеяние остаточной шероховатостью (ИРШ) менее 30ppm удовлетворяют эти подложки, а также подложки №44 и 46, у которых ИРП>30ppm за счет макронеровностей, предположительно из-за загрязнений. Поэтому подложки №44 и 46 прошли дополнительные операции очистки поверхности. Затем на все десять подложек было нанесено отражающее покрытие и проведено АСМ сканирование поверхности зеркал. Компьютерная обработка этих данных показала, что техническим требованиям (ПИР<30ppm) удовлетворяют зеркала №48,53,61,44, (таблица 2), изготовленные на подложках, у которых остаточное интегральное рассеяние только шероховатой поверхностью менее 30ppm.

Экспериментальное измерение полного интегрального рассеяния методом интегрирующей световой сферы [5] показало пригодность зеркал №48,53,55,61,46, полученных на подложках с ИРШ<30ppm.

Таким образом, если бы подложки отбраковывались по параметру полного интегрального рассеяния, то выход зеркал составил бы 4 шт. Дополнительная очистка

подложек, пригодными по коэффициенту интегрального рассеяния только шероховатой поверхностью, увеличивает выход годных зеркал до 5 шт., т.е. на 25%. Аналогичные результаты были получены для других партий подложек и зеркал общим числом около 100 образцов.

Выводы:

- исключение макронеровностей и выступов из расчета параметров рассеяния позволяет получить более объективные данные о состоянии поверхности ситалловых подложек и зеркал лазерного гироскопа.

- шероховатый рельеф поверхности подложек в основном определяет рассеивающие свойства отражающего покрытия, которое нанесено на подложку.

- разработанная методика математического анализа АСМ-сканов подложек и зеркал позволяет получить адекватные данные о причинах брака зеркал по параметрам рассеяния и разработать технологические мероприятия по сокращению производственного брака и увеличению выхода зеркал, соответствующих техническим требованиям.

#### Библиографический список

1. Aronovitz F. Fundamentals of the ring laser gyro/ Optical Gyros and their Application, 1999. RTO-AG-339. P. 3-1 - 3-45.
2. Молчанов А.В. Статистические характеристики подложек зеркал и случайная погрешность лазерного гироскопа./ А.В. Молчанов, А.Ю. Степанов, М.В. Чиркин// Авиакосмическое приборостроение, 2008. №3. С. 9-16.
3. Занавескин М.Л. Связь шероховатости подложки с потерями света на интерференционных зеркальных покрытиях/ М.Л. Занавескин, Б.С. Рошин, Ю.В. Грищенко, В.В.Азарова, В.Е. Асадчиков, А.Л. Толстихина// Кристаллография, 2008. Том 53. №4. С 740-760.
4. Азарова В.В. Теория дифференциального и интегрального рассеяния лазерного излучения прецизионной поверхностью диэлектрика/ В.В. Азарова, В.Г. Дмитриев, Ю.Н. Лохов, К.Н. Малицкий// Квантовая электроника, 2000. Т. 30. № 4. С. 360-364.
5. Patent 5661556 US, G01J 1,04. System for measuring the total integrated scatter of a surface/ Schiff, T. F., Bernt M. L.; 26.08.1997.